



HELSINGIN YLIOPISTO

# **Poistettavien puiden etukäteisvalinnan vaikutus hakkuun tuottavuuteen ja laatuun koneellisessa harvennushakkuussa**

Mika Vahtila

Maisterin tutkielma

Helsingin yliopisto

Metsätieteiden maisteriohjelma

Metsien ekologia ja käyttö

Maaliskuu 2019

Tiedekunta – Fakultet – Faculty		Laitos – Institution– Department	
Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta		Metsätieteiden osasto	
Tekijä – Författare – Author			
Mika Vahtila			
Työn nimi – Arbetets titel – Title			
Poistettavien puiden etukäteisvalinnan vaikutus hakkuun tuottavuuteen ja laatuun koneellisessa harvennushakkuussa			
Oppiaine – Läroämne – Subject			
Metsien ekologia ja käyttö			
Työn laji – Arbetets art – Level	Aika – Datum – Month and year	Sivumäärä – Sidoantal – Number of pages	
Maisterin tutkielma	Maaliskuu 2019	111+5 s.	
Tiivistelmä – Referat – Abstract			
<p>Harvennushakkuun tuottavuus ja laatu riippuvat hakkuukoneenkuljettajasta. Tulevaisuudessa kuljettajaa opastavien järjestelmien uskotaan olevan potentiaalinen ratkaisu parantaa kuljettajan suorituskykyä ja vähentää työn henkistä kuormittavuutta. Mobiililaserkeilaukseen, konenäköön tai näiden yhdistelmään perustuvat sensoriteknologiat mahdollistavat älykkään kuljettajaopastuksen kehittämisen. Uusi sensoriteknologia soveltuu puutason kartoitukseen, jota voitaisiin hyödyntää kuljettajan apuna harvennuksessa poistettavien puiden valinnassa.</p> <p>Tämän työn tavoite oli tutkia poistettavien puiden etukäteisvalinnan eli ennakkoleimauksen hyötypotentiaalia harvennushakkuussa. Ennakkoleimauksen avulla voidaan hakkuutyösuoritetta vertailla tilanteissa, joissa poistettavien puiden valinta perustuu joko hakkuukoneenkuljettajan tekemään päätökseen hakkuutyön aikana tai toimihenkilön laatimaan ennakkosuunnitelmaan. Työn menetelmä oli vertaileva aikatutkimus. Ennakkoleimatuilla koaloilla metsikön poistettavat puut oli merkitty maalilla. Vertailukoaloilla hakkuutyö tehtiin normaaliin tapaan. Testihakkuuiden jälkeen tehtiin korjuujäljen laatumittaus ja kuljettajien haastattelu. Tutkimusaineisto kerättiin Pohjois-Karjalassa elo-syyskuussa 2018. Tutkimusleimikot koostuivat sekä ensiharvennuksista että toisista harvennuksista. Tutkimukseen osallistui yhteensä neljä kokenutta kuljettajaa. Tutkimusaineisto käsitti 4825 hakattua runkoa.</p> <p>Ennakkoleimauksen vaikutus hakkuutyön ajanmenekkiin riippui kuljettajasta. Keskimäärin ennakkoleimaus tehosti hakkuutyötä 2,2 % pienentämällä hakkuulaitteen viennin ajanmenekkiä ja runkokohtaista siirtymisajanmenekkiä. Ennakkoleimatussa harvennuksessa kasvatettavan puuston runkoluku hakkuun jälkeen oli lähempänä metsänhoidon suositusten mukaista tavoitetasoa. Ennakkoleimaus ei merkittävästi vaikuttanut kasvatettavan puuston laatuun. Tutkimuskuljettajat eivät kokeneet merkittävää tarvetta puuvalinnan opastukseen, mutta he hyötyisivät puun laadun ennakkotiedosta ja harvennusvoimakkuuden seurantaan tarkoitettusta sovelluksesta.</p> <p>Ennakkoleimauksen mahdollistama hakkuutyön ajanmenekkisäästö ei todennäköisesti kata puuvalintaa opastavan järjestelmän käyttökustannuksia. Tästä syystä kustannuslaskelmissa on huomioitava ennakkoleimauksen vaikutukset työn laatuun ja kuljettajan työssä jaksamiseen. Tulevaisuudessa uusien sensorijärjestelmien käyttökustannuksia laskee mahdollisuudet hyödyntää sensoriteknologiaa monipuolisesti esimerkiksi metsävarojen inventoinnin ja katkonnanohjauksen sovelluksissa. Lisätutkimusta ennakkoleimauksen hyötypotentiaalista tarvitaan erityisesti kokemattomien kuljettajien osalta.</p>			
Avainsanat – Nyckelord – Keywords			
Ennakkoleimaus, aikatutkimus, kuljettajaa opastavat järjestelmät, sensoriteknologia			
Ohjaajat – Handledare – Supervisors			
Kalle Kärhä, Ville Kankare, Heikki Ovaskainen			
Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited			
Helsingin yliopiston kirjasto – Helda / E-thesis (opinnäytteet) <a href="https://ethesis.helsinki.fi">ethesis.helsinki.fi</a>			
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information			

## ALKUSANAT

Tämä tutkimus on tehty Stora Enso Oyj:n tilauksesta osana hanketta, jossa selvitettiin uuden sensoriteknologian mahdollisuuksia hakkuutyön kehittämisessä. Opinnäytetyö on toteutettu yhteistyössä Metsäteho Oy:n ja Helsingin yliopiston metsätieteiden osaston kanssa. Ajan-kohtaisesta ja tulevaisuuteen suuntautuvasta tutkimusaiheesta haluan kiittää Kalle Kärhää. Kiitos kuuluu kaikille tämän työn toteutukseen myötävaikuttaneille henkilöille tuesta ja pitkämielisyydestä.

Helsingissä maaliskuussa 2019

Mika Vahtila

## SISÄLLYSLUETTELO

<b>1 JOHDANTO .....</b>	<b>6</b>
1.1 Työn tausta .....	6
1.2 Aikaisemmat tutkimukset ennakkoleimauksesta.....	8
1.3 Työn tavoite ja rakenne .....	10
<b>2 HAKKUUKONEIDEN TEKNOLOGIAKEHITYKSEN TULEVAISUUDEN NÄKYMÄT.....</b>	<b>11</b>
2.1 Digitalisaatio teknologiakehityksen ajurina .....	11
2.2 Kuljettajan korvaaminen ja tukeminen.....	13
2.2.1 Automaatio.....	13
2.2.2 Kuljettajaa opastavat järjestelmät.....	15
2.3 Sensoriteknologian integroiminen hakkuukoneisiin .....	17
2.3.1 Sensoriteknologian mahdollistamat hyödyt ja käytännön haasteet.....	17
2.3.2 Laserkeilaus .....	19
2.3.3 Konenäkö .....	21
<b>3 HARVENNUSHAKKUUTYÖ.....</b>	<b>23</b>
3.1 Harvennuksessa poistettavien puiden valintaperiaatteet .....	23
3.2 Poistettavien puiden valintaan vaikuttavat tekijät .....	24
3.2.1 Puun oksaisuus, runkomuoto ja latvusrakenne.....	24
3.2.2 Runkoviat ja sairaudet .....	25
3.2.3 Puulaji.....	26
3.2.4 Korjuukalusto.....	26
3.2.5 Hakkuuperiaate.....	27
3.2.6 Puuvalinnan tekevä henkilö.....	29
3.3 Hakkuukoneenkuljettajan merkitys harvennushakkuussa.....	29
3.3.1 Hakkuukonetyön luonne.....	29
3.3.2 Hakkuukoneenkuljettajan puunvalintaprosessi .....	31
3.3.3 Harvennusvoimakkuuden ja puuvalinnan hallinta .....	33
<b>4 KONEELLISEN PUUNKORJUUN AIKA- JA TUOTTAVUUSTUTKIMUS .....</b>	<b>34</b>
4.1 Aika- ja tuottavuustutkimuksen soveltamiskohteet.....	34
4.2 Työvaiheluokittelu aikatutkimuksessa .....	35
<b>5 AINEISTO JA MENETELMÄT .....</b>	<b>38</b>
5.1 Tutkimuksessa käytetyt aineistot.....	38
5.1.1 Tutkimusleimikot .....	38
5.1.2 Kalusto ja kuljettajat.....	39
5.2 Hakkuukoealojen valmistelu .....	40
5.3 Aikatutkimusaineiston kerääminen hakkuukoealoilta.....	43
5.4 Korjuujälkimittausten tekeminen hakkuun jälkeen .....	47

5.5 Aineiston laskenta .....	48
5.5.1 Työvaiheluokitus .....	48
5.5.2 Aikatutkimusaineiston käsittely.....	49
5.5.3 Työvaiheiden ajanmenekkilaskenta .....	49
5.5.4 Hakkuutyön tehoajanmenekin ja tuottavuuden laskenta .....	53
5.5.5 Korjuutyön laatu .....	55
5.6 Kuljettajien haastattelu .....	56
5.7 Ennakkoleimauksen taloudellisen kannattavuuden laskeminen.....	56
<b>6 TULOKSET .....</b>	<b>59</b>
6.1 Aikatutkimus .....	59
6.1.1 Hakkuulaitteen vienti .....	59
6.1.2 Kaato ja tuonti .....	61
6.1.3 Prosessointi.....	63
6.1.4 Siirtyminen .....	64
6.1.5 Puomin tuonti eteen .....	68
6.1.6 Hakkuutyön kokonaisajanmenekki ja tuottavuus .....	69
6.2 Korjuujälki.....	74
6.2.1 Harvennusvoimakkuus .....	74
6.2.2 Puuvalinta .....	77
6.2.3 Ajouratunnukset .....	79
6.3 Kuljettajien palaute ja puuvalinnan opastuksen tarve .....	80
6.4 Puuvalintaa opastavan järjestelmän kannattavuus.....	84
<b>7 TULOSTEN TARKASTELU .....</b>	<b>86</b>
7.1 Koejärjestely .....	86
7.2 Aikatutkimus .....	87
7.2.1 Tulosten laskentamenetelmä .....	87
7.2.2 Ennakkoleimauksen vaikutus hakkuutyön ajanmenekkiin .....	89
7.2.3 Työvaiheittaiset tutkimustulokset suhteessa aikaisempiin tutkimuksiin.....	91
7.3 Korjuujälki.....	93
7.4 Kuljettajien haastattelu .....	96
7.5 Puuvalintaa opastavan järjestelmän kannattavuus.....	98
<b>8 JOHTOPÄÄTÖKSET .....</b>	<b>99</b>
<b>LÄHTEET .....</b>	<b>105</b>
<b>LIITTEET</b>	

# 1 JOHDANTO

## 1.1 Työn tausta

Harvennushakkuussa osa metsikön puustosta hakataan teollisuuden raaka-aineeksi aines- tai energiapuuksi. Harvennukset voidaan jakaa ensiharvennukseen ja myöhempisiin harvennuksiin. Ensiharvennuksen toteutus perustuu tyypillisesti metsänhoitosuosituksiin (Äijälä ym. 2014). Myöhempien harvennusten toteutukseen vaikuttavat sekä taloudelliset että metsänhoidolliset tekijät, mutta myös metsänomistajan tavoitteet (Hynynen & Huuskonen 2014). Harvennushakkuiden tärkein tavoite on puuntuotannon taloudellisen kannattavuuden parantaminen (Penttilä ym. 2000).

Suomessa puunkorjuu perustuu pohjoismaiseen eli koneelliseen tavaralajimenetelmään, joka on saanut alkunsa jo 1970-luvun lopulla (Gellerstedt & Dahlin 1999). Tavaralajimenetelmässä puut kaadetaan, karsitaan ja katkotaan määrämittäisiksi tavaralajeiksi teollisuuden tarpeiden ja laatukriteerien mukaan ennen puutavaran lähikuljetusta tienvarsivarastolle (Uusitalo 2010). Pohjoismaisen tavaralajimenetelmän koneketju koostuu ajourilta toimivasta yksiottehakkukoneesta eli -harvesterista ja lähikuljetuksen suorittavasta kuormatraktorista (Uusitalo 2010). Koneellisen tavaralajimenetelmän haaste on se, että hakkukoneelta vaaditaan suurta tehokkuutta sen korkeiden käyttökustannusten takia (Purfürst & Erler 2011).

Korjuukustannukset korostuvat harvennushakkuussa. Vuonna 2017 harvennushakkuiden osuus oli 39,9 % (16,0 milj. m<sup>3</sup>) ainespuun kokonaiskorjuumäärästä, mutta puunkorjuun kustannuksista harvennusten osuus oli 53,8 % (Strandström 2018). Ensiharvennusten yksikkökustannukset (16,81 €/m<sup>3</sup>) olivat jopa yli kaksinkertaiset verrattuna uudistushakkuihin (8,12 €/m<sup>3</sup>) (Strandström 2018). Ensiharvennuksissa korjuukustannuksia nostavat runkojen pieni keskikoko, pieni hehtaarikohtainen hakkukertymä sekä korjuussa jätettävät puut (Kärhä ym. 2004), joiden vahingoittamista on korjuutyössä vältettävä.

Korjuukustannuksia on mahdollista pienentää nostamalla hakkuutyön tuottavuutta. Harvennusvoimakkuuden kasvattamisella, erilaisten harvennusperiaatteiden käytöllä tai harvennusten viivästyttämisellä saadaan hakkuutyön tuottavuutta kasvatettua (Kuitto ym. 1994, Hynynen & Saramäki 1995, Hynynen & Huuskonen 2014). Kuitenkin metsänhoitosuosituksista

poikkeaminen voi altistaa metsikön erilaisille tuhoille (Cameron 2002, Elfving 2009, Wallentin & Nilsson 2013) ja laskea metsikön kokonaistuottoa (Hynynen & Arola 1999, Penttilä ym. 2000). Siksi hakkuutyön tuottavuuden nostaminen ei tulisi perustua kestäättömiin harvennuskäytäntöihin.

Korjuukustannusten pienentäminen on merkittävä teknologiakehityksen ajuri (Lindroos ym. 2017). Suomessa puuhuollon eli puuntuotannon ja puunhankinnan tavoitellaan olevan jopa 30 % nykyistä kustannustehokkaampaa vuoteen 2025 mennessä (Metsäteho Oy 2015). Hakkuukonetyön tuottavuutta on saatu nostettua lähinnä peruskoneiden teknisten parannusten ansiosta, eikä Suomen olosuhteisiin soveltuvia kokonaan uusia ja kustannustehokkaita konemalleja ole kehitetty (Nurminen ym. 2006). Jo tehtyjen teknisten parannusten myötä peruskoneiden tuottavuuden nostaminen on tullut yhä vaikeammaksi. Hakkuukonetyön tuottavuutta tulisi parantaa koneiden tehokkaammalla käytöllä.

Harvennushakkuiden haaste on alhaisen tuottavuuden lisäksi korjuutyön laatu. Puunkorjuussa työn laatua kuvataan korjuujäljellä. Korjuujäljen osatekijöitä ovat puuvalinta, harvennusvoimakkuus, maasto- ja puustovauriot sekä ajourien ominaisuudet (Littiäinen ym. 2013). Viime vuosina korjuujäljen taso on pysynyt Suomessa alhaisena. Vuosina 2011–2017 huomautettavan tai virheellisen korjuujäljen kohteiden määrä on vaihdellut välillä 37–63 % (Suomen metsäkeskus 2018). Vuonna 2017 lähes 20 % korjuujäljen huomautuksista tai virheistä selitti liian suuri harvennusvoimakkuus. Puunkorjuun laatuun tulisi kiinnittää enemmän huomiota, sillä huonon korjuujäljen sekundäärivaikutuksena voi syntyä kasvutappioita sekä hyönteis-, tuuli- ja lumituhoja (Sirén 1998), mitkä vaikuttavat paitsi metsätalouden kannattavuuteen myös asiakastytyvyyteen.

Metsäteknologisen aika- ja tuottavuustutkimuksen (esim. Rajamäki ym. 1996, Kärhä ym. 2004 ja Väättäinen ym. 2005) ansiosta sekä puunkorjuuryitysten kokemusten (Ylimäki ym. 2012) perusteella on yleisesti tiedossa, että kuljettajalla on suuri vaikutus hakkuukonetyön tuottavuuteen ja laatuun. Koneellisen puunkorjuun kehittäminen tulisi kohdentaa kuljettajan työolosuhteiden parantamiseen, kuljettajaa opastavien järjestelmien kehittämiseen ja työvaiheiden osittaiseen automatisointiin (Melkas ym. 2014). Kuljettajan tukeminen ja korvaaminen erilaisissa hakkuutyön toiminnoissa mahdollistaa koneiden tehokkaamman käytön.

Puun korjuun teknologiassa robotiikan ja automaation odotetaan yleistyvän (Lindroos ym. 2017). Metsäteknologian merkittävimmät kehitysharppaukset tulevat todennäköisesti uusien ja parempien sensorien kehittämisen myötä (Murphy 2010). Mobiililaserkeilaukseen, koneenäköön tai näiden yhdistelmään perustuvat sensoriteknologiat mahdollistavat reaaliaikaisen tiedonkeruun metsäkoneen työympäristöstä (Öhman ym. 2008). Sensorien tuottaman informaation hyödyntäminen mahdollistaa älykkään puunkorjuun kehittämisen (Vancley 2009). Uusi sensoriteknologia soveltuu puutason kartoitukseen, jota voitaisiin lähitulevaisuudessa hyödyntää kuljettajan apuna harvennuksessa poistettavien puiden valinnassa (Holopainen ym. 2013).

Puuvalinnan opastuksella harvennus voitaisiin kohdistaa metsänhoidollisesti oikeisiin puihin, hallita harvennusvoimakkuuden toteutumista, ja mahdollisesti nostaa hakkuutyön tuotavuutta. Toistaiseksi puuvalintaa opastavia älykkäitä järjestelmiä ei ole operatiivisessa käytössä, mutta hakkuukoneenkuljettajat ja metsäkoneyrittäjät ovat osoittaneet kiinnostusta hyödyntää sensoriteknologian mahdollisuuksia (Kauppinen ym. 2016). Tästä syystä aiheeseen liittyvä tutkimus on ensiarvoisen tärkeää.

## **1.2 Aikaisemmat tutkimukset ennakkoleimauksesta**

Suomessa ennen harvennushakkuuta tehtävä poistettavien puiden etukäteisvalinta eli ennakkoleimaus<sup>1</sup> on ollut historiallisesti vallitseva käytäntö leimikon valmistelussa ja suunnittelussa vielä 1980-luvulla (Metsäteho 1982, Lilleberg 1995). Poistettavien puiden merkintä on tehty metsurin tai korjuuesimiehen toimesta, mikä on kuluttanut puunkorjuuoperaatioihin käytettäviä henkilöresursseja ja laskenut puunkorjuun kannattavuutta (Päivänen & Taipale 1981). Ennakkoleimaus on ollut usein osa leimikon pystymittausta, jonka yhtenä tarkoituksena on ollut tuottaa arvio hakkuukertymästä puutavaralajeittain (Pennanen 1978). Sittemmin nykyaikaisen hakkuukonemittauksen käyttöönotto on mahdollistanut sen, että maastotöinä

---

<sup>1</sup> Ennakkoleimauksen toteutusta on kuvailtu suomalaisessa kirjallisuudessa heikosti. On kuitenkin yleisesti tiedossa, että perinteisessä ennakkoleimauksessa poistettavat puut merkitään käyttäen esimerkiksi kirvestä, jolla puu merkitään poistamalla puun kuori. On olemassa myös käänteiseen menetelmään perustuvaa ennakkoleimaus, jossa säästettävät puut merkitään. Säästettävien puiden merkitsemisen etuna on se, että jäävän puuston laatu ja tilajärjestys on helpompi hahmottaa ennen kuin hakkuutyö on tehty (Self & Parker 2017).



tehtävästä puiden yksilöinnistä ja leimauksesta on luovuttu. Nykyisin ennakkoleimausta onkin käytetty lähinnä jatkuvan kasvatuksen poimintahakkuiden tutkimuksissa (esim. Surakka & Sirén 2007).

Viimeisten vuosikymmenien aikana ulkomailla ennakkoleimausta on käytetty edelleen esimerkiksi Pohjois-Amerikassa (Self & Parker 2017). Syy ennakkoleimauksen käyttöön on ollut oikean puuvalinnan varmistaminen siten, että korjuussa huomioidaan puuntuotannolliset ja ekologiset näkökulmat (Grimm 2015). Ennakkoleimauksen käyttö on vähentynyt korjuukaluston kehityksen ja puunkorjuun kustannussäästöjen takia (Grimm 2015). Esimerkiksi Missisipissä männiköiden ennakkoleimaus tehdään usein vain toisessa ja kolmannessa harvennuksessa tai maanomistajan pyynnöstä (Self & Parker 2017).

Suomessa ennakkoleimauksen vaikutusta koneellisen hakkuutyön tuottavuuteen on tutkittu 1980-luvulla. Kuiton & Mäkelän (1988) tutkimuksessa ennakkoleimaus kasvatti hakkuun ajanmenekkiä ja lisäsi korjuuvaurioiden lukumäärää. Tutkimus antoi selviä viitteitä siitä, että koneellisessa puunkorjuussa perinteisestä ennakkoleimauksesta luopuminen on perusteltua. Tutkimuksessa käytetty korjuukalusto ja 35 metrin ajouraväli eivät enää vastaa nykyisiä käytänteitä.

Ulkomaisissa tutkimuksissa on muutamia esimerkkejä ennakkoleimauksen käytöstä koneellisen tavaralajimenetelmän puunkorjuussa. Grimm (2015) selvitti, vastaako hakkuukoneenkuljettajan tekemä puuvalinta laadultaan toimihenkilön tekemää ennakkoleimausta Yhdysvaltojen Mainessa tehdyissä kokeissa. Tutkimusleimikot olivat yli kymmenen puulajin sekametsiä. Kokeissa oli mukana sekä ennakkoleimattuja että ns. ”haamuleimattuja” koealoja. Haamuleimauksessa leimaamattomilta koealoilta oli etukäteen kartoitettu puut, jotka pitäisi poistaa hakkuussa. Puuvalinnan laatua arvioitiin vertaamalla hakkuukoneenkuljettajan tekemää valintaa ja haamuleimausta keskenään. Harvennusvoimakkuus ja hakkuutyön tuottavuus olivat samalla tasolla riippumatta poistettavien puiden merkinnästä. Tuottavuuden arveltiin pysyvän vakiona laadun kustannuksella, sillä kuljettajan tekemä puuvalinta ei vastannut metsänhoidollisia kriteereitä yhtä hyvin kuin ennakkoleimaus.

Kellog & Bettinger (1994) tutkivat ennakkoleimauksen vaikutusta hakkuutyön tuottavuuteen Yhdysvaltojen Oregonissa, Cascade-vuorilla. Tutkimusleimikon puulajit olivat douglaskuusi

(*Pseudotsuga menziesii*) ja lännenhemlocki (*Tsuga heterophylla*). Ennakkoleimaus ei vaikuttanut työn tuottavuuteen tai poistuman keskiläpimittaan merkitsevästi. Yeon ja Stewart (2000) tutkivat ennakkoleimauksen vaikutusta korjuutyön laatuun ja tuottavuuteen radiatamännyn istutusplantaaseilla tehdyissä kokeissa Australiassa. Kokeissa oli mukana sekä ensi- että myöhempiä harvennuksia. Ennakkoleimauksella ei havaittu olevan vaikutusta hakkuutyön tuottavuuteen tai jäävän puuston laatuun. Leimatuissa ja leimaamattomissa harvennuksissa jäävän puuston läpimittajakauma ja tiheys olivat yhdenmukaiset. Lageson (1997) tutki puolestaan korjuuvaurioiden määrää ylä- ja alaharvennuksilla. Tutkimusleimikoista osa oli ennakkoleimattuja. Ennakkoleimaus ei lisännyt korjuuvaurioiden määrää. Ennakkoleimauksella ei ollut merkittävää vaikutusta hakkuutyön tuottavuuteen tai harvennusvoimakkuuteen.

### 1.3 Työn tavoite ja rakenne

Tutkimuksen tavoite oli selvittää ennakkoleimauksen hyötypotentiaali harvennushakkuussa. Tutkimuksessa tarkasteltiin, miten hakkuutyön tuottavuus ja laatu muuttuvat, jos kuljettajalle annetaan ennakkotieto harvennushakkuulla poistettavista puista. Tutkimus kartoitti käytännön edellytyksiä tavoitetilalle, jossa hakkuukoneeseen on asennettu laserkeilain ja toimiva teknologia (tai jokin muu sovellus, esimerkiksi konenäköön perustuva ratkaisu), jonka avulla kuljettaja näkee automaattisen ennakkoleimauksen tuloksen.

Työn keskeisiä tutkimuskysymyksiä ovat:

1. Mikäli kuljettajan ei tarvitse valita harvennuksessa poistettavia puita:
  - a) Väheneekö hakkuutyön ajanmenekki?
  - b) Muuttuvatko harvennusvoimakkuus ja puuvalinta?
2. Mikä on ennakkoleimauksen merkitys ensiharvennuksessa ja toisessa harvennuksessa?
3. Miten kuljettajat kokevat puuvalinnan opastuksen?
4. Mikä on uuteen sensorteknologiaan perustuvan ennakkoleimauksen todennäköinen hyötypotentiaali?

Työn kirjallisuuskatsaus on jaettu kolmeen eri osaan. Ensimmäisessä osiossa tehdään katsaus metsäteknologian arvellusta kehityssuunnasta. Tarkasteltavia kehitysalueita ovat automaation ja kuljettajaa opastavien järjestelmien käyttöönotto uusien mittausteknologioiden avulla. Kirjallisuusosion toinen osio käsittelee harvennushakkuukonetyön luonnetta ja puuvalintaan vaikuttavia tekijöitä. Kuljettajien kokema tarve opastaviin järjestelmiin on kehitystyön lähtökohta. Harvennuksessa poistettavien puiden ominaisuuksien ymmärrys on perusta älykkäiden järjestelmien kehitykseen. Kirjallisuuskatsauksen kolmas osio on katsaus koneellisen puunkorjuun aika- ja tuottavuustutkimuksesta. Tämä on työn menetelmän kannalta tarpeellista.

Kirjallisuuskatsauksen jälkeen on esitelty tässä tutkimuksessa käytetty aineisto ja menetelmät. Tutkimustulosten perusteella on arvioitu ennakkoleimauksen hyötypotentiaalia hakkuutyön tehokkaan ja laadukkaan toteutuksen kannalta. Kustannuslaskelmien avulla pohdittiin olemassa olevien sensortechnologioiden hyöty-kustannussuhdetta ennakkotiedon tuotannossa. Pohdinnan tarkoituksena oli saada yhteenvetotieto siitä, miten hakkuukoneyrittäjä tai puunhankintaorganisaatio voisi tulevaisuudessa hyötyä investoinnista uutta sensortechnologiaa hyödyntävistä älykkäistä järjestelmistä.

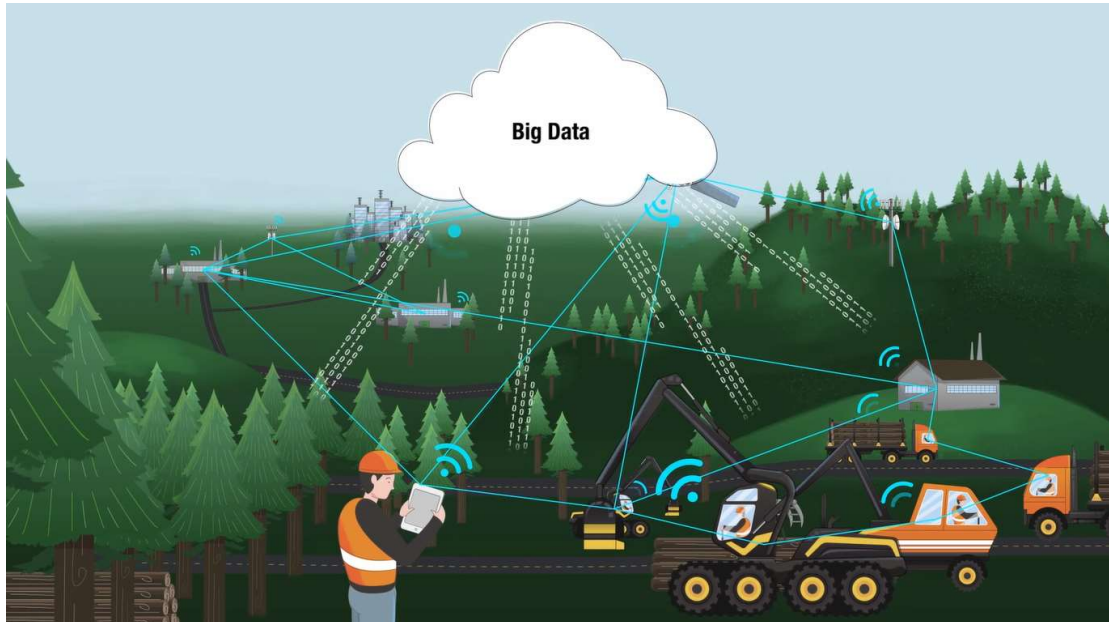
## **2 HAKKUUKONEIDEN TEKNOLOGIAKEHITYKSEN TULEVAISUUDEN NÄKYMÄT**

### **2.1 Digitalisaatio teknologiakehityksen ajurina**

Lähitulevaisuudessa puuhuollon rakenteiden odotetaan uudistuvan digitalisaation, ja erityisesti teollisen internetin käyttöönoton myötä (Metsäteho 2015). Nykyisin metsävaratieto on jo pitkälti digitalisoitunut ja metsätalouden operatiivisessa toiminnassa hyödynnetään paljon digitaalista metsätietoa.

Digitalisaation merkittävä ajuri on metsäkoneiden automaation ja mittaustekniikan kehittäminen (Räsänen 2017). Tulevaisuuden visiossa metsäoperaatioiden tuottamat tietovarastot kerryttävät suuria tietomassoja, Big Dataa, jota hyödynnetään puuhuollon toiminnanohjauksessa ja päätöksenteossa (kuva 1) (Metsäteho 2015). Ennen kuin tietoja voidaan tehokkaasti hyödyntää, pitää tietojärjestelmiä kehittää niiden yhteensopivuuden ja käytettävyyden osalta

(Asikainen ym. 2009). Metsäkonealalla teknologian kehitystä on hidastanut yhteisten standardien vähäisyys (Asikainen ym. 2009).



**Kuva 1.** Puuhuollon digitalisoituminen ja teollisen internetin käyttöönotto vauhdittavat hakkuukoneiden teknologiakehitystä. Eri toimijoiden tuottamat tietomassat muodostavat Big Datan, jonka tehokasta yhdistämistä ja analysointia voidaan hyödyntää toiminnanohjauksessa ja päätöksenteossa (Metsäteho 2015). (kuva: YouTube, FPIinnovations).

Hakkuukoneiden kehittynyt nykyteknologia muodostaa uusien digitaalisten järjestelmien perustan. Metsäkoneissa on käytössä CAN-väylätekniikkaan perustuvat hallinta- ja informaatiojärjestelmät, GPS-paikannus, ja langaton tiedonsiirto (Billingsley ym. 2008). Digitalisaatio ja sen mahdollisuudet tulevat esille metsäkonevalmistajien tekemissä innovaatioissa. Ponsse Oyj:n hakkuukoneisiin suunniteltuja tietoteknisiä innovaatioita ovat koneen toimintojen (esim. tuotostieto, polttoaineenkulutus ja työtunnit) reaaliaikainen seuranta, sovellus harvennuksessa jäljelle jäävän puuston määrästä, hakkuukoneen toimintojen puheohjaus ja kuljettajan vireystilaa monitoroiva kamerajärjestelmä (Lähtenmäki 2018). Hakkuukoneen sijaintitiedon perusteella voidaan muodostaa digitaalinen ajouraverkosto automaattisesti (Melkas ym. 2018). Ajouratietoa hyödyntämällä voidaan osoittaa hakkuukoneen kaatamat puut sähköisellä kartalla lähikuljetusta varten, kuten John Deeren TimberMatic Maps -soveluksessa (John Deere Oy 2019).

Uusien sensoriteknologioiden integroiminen hakkuukoneisiin muodostaa täysin uudenlaisen tiedonkeruumenetelmän, jonka myötä tuotetun tiedon määrä kasvaa merkittävästi. Kun aineiston käsittelyyn ja tiedonhallintaan liittyvät haasteet on ratkaistu, uudella sensoriteknologialla uskotaan saavutettavan merkittäviä hyötyjä (Murphy 2010). Uuden teknologian käyttöönottoon liittyy kuitenkin riskejä, jotka eivät saa olla suurempia kuin tuottavuuden ja kokonaistehokkuuden parannuspotentialiaali (Asikainen ym. 2009).

## **2.2 Kuljettajan korvaaminen ja tukeminen**

### **2.2.1 Automaatio**

Automaatiossa tietokone ottaa vastuulleen toimintoja, jotka ihminen normaalisti tekisi. Automaatio voidaan kohdistaa jokaiseen ihmisen informaation käsittelyprosessin osaan, joita ovat 1) tiedon hankinta, 2) tiedon analysointi, 3) päätöksenteko ja toimintavaihtoehdon valitseminen sekä 4) toiminnan toteutus (Parasuraman 2000). Automaatiojärjestelmien yhteydessä puhutaan usein tekoälystä. Tekoäly voi perustua monimutkaiseen laskentaan eli algoritmeihin, sääntöihin ja logiikkaan tai suuriin tietomääriin, joiden avulla automaatiojärjestelmiä ”opetetaan” (Rintanen 2018). Tietokoneiden kasvanut laskenta- ja muistikapasiteetti on mahdollistanut tekoälyn, joka pystyy reagoimaan tilanteisiin aikaisemman tiedon perusteella (Rintanen 2018).

Automatisointi voidaan toteuttaa eriasteisesti. Alhainen automaatiotaso merkitsee alhaisempia järjestelmä perustamiskustannuksia, työntekijän hyvää tilannetietoisuutta, työprosessin korkeaa luotettavuutta ja parempaa sopeutumista automaation aiheuttamiin häiriöihin (Kaber & Endsley 2004). Korkea automaatioaste johtaa suurempaan tuottavuuteen, parantaa työympäristöä vähentämällä ihmisen fyysistä työmäärää sekä laskee järjestelmän käyttökustannuksia (Kaber & Endsley 2004). Se, mitä automatisoidaan ja missä mittakaavassa, pitää määrittää huomioiden ihmisen suorituskykyyn liittyvät ongelmat (Parasuraman 2000).

Korvaamalla kuljettaja metsäkonetyössä voitaisiin saavuttaa merkittäviä kustannussäästöjä, sillä kuljettajan palkka on noin 30–40 % hakkuukoneen tuntikustannuksesta (Hellström ym. 2009). Automaatio kuitenkin harvoin korvaa ihmisen työpanoksen kokonaan. Ihmistä tarvi-

taan vähintään prosessin valvontaan, vaikka kaikki työprosessin vaiheet olisivat automatisoituja (Westerberg 2014). Automaatio muuttaa ihmisen käytöstä ja roolia työssä. Erityisesti semi-automatisoidun järjestelmän käyttäjän pitää ymmärtää työprosessi riittävän hyvin, jotta työntekijä voi vaikuttaa automaatiojärjestelmän kanssa oikealla, turvallisella ja tehokkaalla tavalla (Westerberg 2014). Automaatioon liittyy haaste oikeanlaisen luottamuksen asettamisesta automatisoitua järjestelmää kohtaan. Luottamuksen puute aiheuttaa käyttäjässä epävarmuutta ja liiallinen tukeutuminen automaatioon voi johtaa ehkäistävissä olevien onnettomuuksien syntymiseen helpommin (Parasuraman 2000).

Metsäkoneiden automatisointia on yritetty jo vuosikymmenien ajan (Billingsley ym. 2008). Automaatiopyrkimyksistä huolimatta, toistaiseksi ainoastaan puiden prosessointi eli karsinta ja katkonta on pystytty puoliautomatisoimaan (Ovaskainen 2009). Automaattisten järjestelmien luomiseen liittyy useita teknisiä haasteita liittyen sensorien ominaisuuksiin, hallintalaitteisiin ja ohjelmistoihin (Parasuraman 2000). Merkittävin automaatiota rajoittava tekijä on metsäkoneiden epäjärjestynyt työympäristö, josta ei ole saatavissa tarkkaa ennakkotietoa (Lindroos ym. 2017). Autonomisia metsäkoneita käsittelevissä tutkimuksissa (Vestlund & Hellström 2006, Hellström ym. 2009, Ringdahl ym. 2011) on esiintynyt haasteita saada sensorit havainnoimaan ja ymmärtämään metsäympäristön rakennetta. Täysautomaatiossa metsäkoneen tulisi ymmärtää peruskoneen ja sen osien sijainti ja tila (Lindroos ym. 2017), tulkitsemaan kuinka kohteet (puut/rungot/pölkyt) ovat sijoittuneet suhteessa ympäristöön sekä määrittää puiden laatutekijöitä (Billingsley ym. 2008). Monimutkainen havainnointi asettaa haasteita päätöksentekojärjestelmälle siitä, miten hakkuutyö pitäisi tehdä (Lindroos ym. 2017).

Luotettava havainnointi sekä puustotunnusten reaaliaikainen mittaaminen on metsäkoneiden autonomisten toimintojen kehitystyön pullonkaula (Billingsley ym. 2008). Tekniikka kuormatraktorin kuorman purun automatisointiin on kuitenkin jo olemassa (Lähteenmäki 2018). Toteutuessaan autonomisen kuormatraktorin on katsottu perustuvan yhtäaikaisen paikannuksen ja kartoituksen -menetelmään (Billingsley ym. 2008). Yhtäaikaisen paikannuksen ja kartoituksen menetelmä tunnetaan nimellä SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) (Öhman ym. 2007). Suomessa on kehitetty tulevaisuuden konsepti, jossa hakkuukone valmistaa puutavaran suoraan siirrettävään kuormatilaan (Loponen 2018). Hakkuukone lähettää

kulkureittinsä miehittämättömälle ajokoneelle, joka noutaa kuormatut puut automaattisesti hakkuukoneelta.

Harvennushakkuutyön automatisointi on vaikeaa kuljettajalta vaadittavien lukuisten ratkaisujen takia (Lähteenmäki 2018). Täysin autonominen hakkuukone näyttää olevan kaukana tulevaisuudessa, sillä jokaisella metsäkuviolla on alueita, joissa hakkuukonetta voi ohjata ainoastaan kuljettaja (Billingsley ym. 2008). Todennäköisesti autonominen hakkuukone otetaan käyttöön ensimmäisenä plantaasimetsissä (Loponen 2018) ja avohakkuissa (Asikainen ym. 2005). Ennen hakkuukoneiden täysautomatisointia, semiautomatisoituja ratkaisuja ja uusia päätöstukijärjestelmiä voidaan ennakoida otettavan käyttöön (Westerberg 2014).

### ***2.2.2 Kuljettajaa opastavat järjestelmät***

Metsäteknologian tärkeä kehitysalue on informaatio-ergonomia eli automatisoitujen työvaiheiden ja ihmistyön optimaalinen työnjako (Asikainen ym. 2009). Kuljettajilla on jo nykyisin käytössään erilaisia työntekoa helpottavia järjestelmiä, kuten tietokoneet, karttaohjelmat sekä katkonnanohjaus (Ylimäki ym. 2012). Hakkuutyön ennakkosuunnittelussa kuljettajat hyötyisivät erityisesti leimikon kulkukelpoisuutta ja erityiskohteita kuvaavista karttaopasteista (Kauppinen ym. 2016). Tulevaisuudessa kuljettajaa opastavat älykkäät järjestelmät tulevat puunkorjuukoneisiin jo olemassa olevien järjestelmien lisäksi ja tueksi (Ylimäki ym. 2012).

Kuljettajaa opastavilla järjestelmillä pyritään ylläpitämään metsäkonetyön tuottavuus ja hyvä korjuujälki ehkäisemällä tilanteita, joissa kuljettaja joutuu tekemään päätöksiä epävarmuuden ja puutteellisen tiedon vallitessa (Kauppinen ym. 2016). Kuljettajaopastuksen tavoitteena on helpottaa kuljettajaa työn suunnittelussa ja päätöksenteossa sekä poistaa epävarmuutta työskentelyn aikana (Ylimäki ym. 2012). Kuljettajalle tarjottu päätöstuki paitsi auttaa säävuttamaan puunkorjuulle asetetut tavoitteet, myös parantaa kuljettajan jaksamista, kun työhön liittyyä henkistä raskautusta saadaan vähennettyä (Kauppinen ym. 2016).

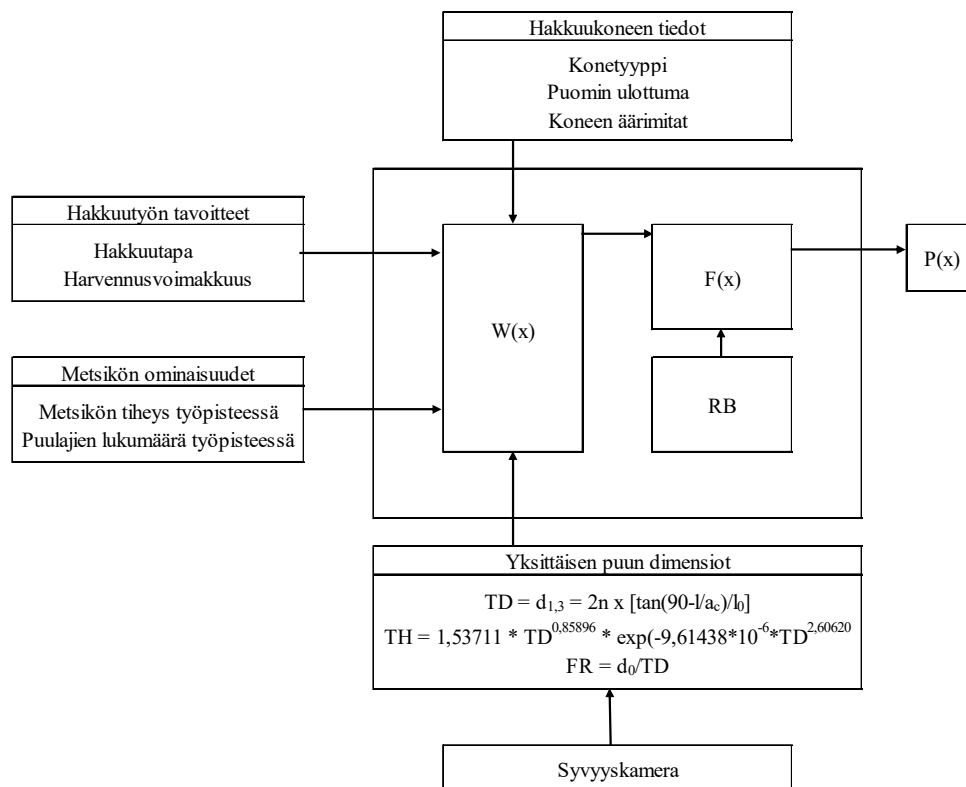
Puunkorjuuyrittäjät ovat kokeneet aloittelevien kuljettajien puutteellisen kokemuksen olevan merkittävä ongelma (Ylimäki ym. 2012). Opastuksesta arvellaan olevan hyötyä varsinkin kokemattomille kuljettajille, mutta myös kokeneille kuljettajille joissakin työn osa-alueisissa (Väätäinen ym. 2013). Kuljettajaopastus auttaisi nostamaan heikompitasoisten kuljettajien

tuottavuutta ja vähentäisi uusien kuljettajien henkilökohtaisten opastuksen tarvetta. Kokeuttomien kuljettajien henkilökohtainen opastus on koettu liian kalliiksi (Ylimäki ym. 2012), vaikka siten voitaisiin turvata kuljettajan kehittyminen työssään.

Opastavissa järjestelmissä tulisi kiinnittää huomiota siihen, missä muodossa lisäinformaatio esitetään hakkuukoneenkuljettajalle. Sensoridataa voidaan muokata korostamalla ja/tai suodattamalla (Parasuraman 2000). Kuitenkin esimerkiksi mobiililaserkeilauksen ongelmaksi on katsottu se, ettei mittaustulosta voida näyttää nopeasti, helposti ja intuitiivisesti kuljettajalle (Wang ym. 2013). Nykyisin hakkuukoneen tietokoneen näyttöpäätte on ainoa tapa esittää kuljettajalle työntekoa helpottavaa tietoa. Hakkuukoneenkuljettaja keskittyy hakkuupään liikkeen havainnointiin valtaosan työajasta (Väätäinen ym. 2004). Tästä syystä näyttöpäätte soveltuu puustoa koskevan lisätiedon visualisointiin huonosti. Kuljettajalle esitettävän lisäinformaatio voidaan liittää kuljettajan työnäkymään lisätyn todellisuuden käyttöliittymän avulla (Palonen ym. 2017).

Toistaiseksi kuljettajan puuvalinnan opastukseen tai harvennusvoimakkuuden seurantaan tarkoitettuja kaupallisia järjestelmiä ei ole kehitetty, mutta innovaatiokokeiluja on jo tehty (kuva 2). Hokka & Räsänen (2000) kehittivät metsävaratiedon päivitystä varten jäävän puuston arviointimenetelmän, jonka arveltiin olevan potentiaalinen keino myös harvennusvoimakkuuden seurantaan. Menetelmässä hakkuukonedatan, GPS-paikannetun ajouran pituuden ja asetetun työleveyden perusteella laskettiin hehtaarikohtainen poistumatieto, jota käytettiin kuljettajan apuna silmävaraisessa jäävän puuston arvioinnissa. Menetelmän riippuvuus kuljettajasta, metsäkoneiden huono sijaintitarkkuus ja varsinkin spatiaalisesti epätarkka puustotieto ennen harvennusta heikensivät menetelmän toimivuutta harvennusvoimakkuuden seurannassa.





**Kuva 2.** Konenäköjärjestelmässä käytettävä matemaattinen puuvalintamalli.  $W(x)$  ja  $F(x)$  ovat las-kentafunktioita, joihin vaikuttavat päätöksentekotilanteen lähtötiedot ja hakkuutyötä koskevat rajoi-tukset (RB). Tuloksena saadaan puun todennäköisyys,  $P(x)$ , tulla hakatuksi. Kaaviossa  $TD$  = rinnan-  
korkeusläpimitta,  $TH$  = pituus ja  $FR$  = runkomuoto. (kuva: Pethukov ym. 2015, muokattu).

## 2.3 Sensoriteknologian integroiminen hakkuukoneisiin

### 2.3.1 Sensoriteknologian mahdollistamat hyödyt ja käytännön haasteet

Mahdollisuudet kehittää metsävarojen inventointia vaikuttaa merkittävästi uuden sensoritek-nologian hyötypotentiaaliin. Hyödynnettäessä hakkuukonetta kartoitusalueena, sensorijär-jestelmät soveltuvat automaattiseen tiedonkeruuseen. Sensoriteknologian kehittyminen tar-joaa mahdollisuuden arvioida metsäkuvioita nopeammin, paremmin ja halvemmin (Vanclay 2011). Laserkeilauksella saatava tieto metsikön kasvusta auttaisi tekemään päätöksiä seuraa-vasta hakkuusta ja sen arvokertymästä (Loponen 2018). Erilaisten laserkeilausmenetelmien, kuten mobiililaserkeilauksen, hyödyntäminen yhdessä hakkuukonemittauksen kanssa mah-dollistaa ns. täsmämetsätalouteen siirtymisen (Holopainen & Hyypä 2009). Täsmämetsäta-lous tuottaisi merkittäviä kustannussäästöjä sekä lisäarvoa puun jalostusketjussa (Holopainen

ym. 2013). Uudet metsävaratietoon perustuvat puunkorjuun sovellukset kuten WoodForce (Trimble Forestry 2019) tai Korjuukelpoisuuskartta (Suomen metsäkeskus 2019) saattaisivat hyötyä sensoriteknologian avulla tuotetuista tietomassoista.

Ovaskaisen & Hämäläisen (2018) mukaan sensoriteknologiaa voitaisiin hyödyntää korjuujäljen automaattisessa hallintajärjestelmässä. Laserkeilauksella voidaan monitoroida harvennusvoimakkuutta, ajouraleveyttä ja ajourapainumia. Yhdistämällä konenäkö ja laserkeilaustekniikka, pystytään tuottamaan tietoa puustosta, ajourista, puustovaurioista ja kantokäsittelystä, sekä esimerkiksi metsälakikohteista ja käsittelyn ulkopuolelle jätetyistä kohteista. Korjuujäljen automaattinen hallintajärjestelmä soveltuu paitsi kuljettajan opastukseen, myös laaturaportointiin puuhuollon toimijoille ja asiakkaille.

Sensoriteknologiaa voitaisiin hyödyntää kuljettajan työn tukemiseen. Hakkuukoneella tehtävä reaaliaikainen tiedonkeruu mahdollistaa optimaalisen puukohtaisen päätöksenteon huomioiden lopputuotteet, metsänhoitosuositukset ja metsikön kasvukyvyn (Vanclay 2011). Tällöin älykkäiden järjestelmäkonseptien, kuten puuvalintaa opastavan järjestelmän, luominen on mahdollista. Mikäli konenäön tai laserkeilauksen avulla pystyttäisiin tunnistamaan tukin laaturajoja, tukin katkonnan puoli- tai täysautomatisointi olisi mahdollista (Kärhä ym. 2017).

Sensoriteknologian käyttöönotto operatiivisella tasolla voi tuottaa aluksi lisäkustannuksia (Vanclay 2010). Toisaalta kustannussäästöjä saavutetaan tehokkaammalla metsien käsittelyllä, suuremmalla turvallisuudella, paremmilla ja tasaisemmilla tuotteilla, sekä lievemmillä ympäristö- ja ekologisilla vaikutuksilla (Murphy 2010). Uuden sensoriteknologian käyttöönotto voi olla tuottavuuden sijasta osoitus sitoutumisesta ympäristömääräyksiin ja yrityksen ohjeisiin (Vanclay 2010). Ajan mittaan sensorien hankintakustannus ei ole ongelma, vaan kyse on enemmän laitteiden ylläpidosta ja luotettavuudesta (Vancaly 2010). Metsä on hyvin haastava ympäristö erilaisille antureille ja sensoreille (Billingsley ym. 2008). Uusi teknologia on myös potentiaalinen vikalähde, eivätkä metsäkoneiden kalliit pääoma- ja korjauskustannukset salli suurta työkeskeytysten osuutta (Asikainen ym. 2009).

Mobiilikartoituksen haaste on sen vaihteleva tarkkuus ja aineiston työläs prosessointi. Mitataustarkkuuteen vaikuttaa sensorin etäisyys ja sijainti suhteessa mitattavaan kohteeseen sekä puuston peitteisyys, kuten alikasvoksen ja oksien määrä (Melkas ym. 2014, Petukhov ym.

2015). Hakkuukoneesta kaukana sijaitsevat puut voivat jäädä kokonaan toisten puiden katveeseen. Yhdistämällä peräkkäisten työpisteiden mittaustietoja, peitteisyyttä pystytään vähentämään ja siten mittaustarkkuutta parantamaan (Melkas & Hämäläinen 2015). Sensoridatan laatuun vaikuttaa myös tuuli, joka aiheuttaa puiden runkojen ja oksien liikehdintää (Pyörälä ym. 2018). Hakkuukoneen heilahdusliikkeet ovat ongelma syvyyskameratekniikan hyödynnettävyydelle (Melander 2018). Sensoridatan prosessointiaikaa voidaan lyhentää luokittelemalla pistepilviaineistoa, ja analysoimalla ainoastaan mielenkiinnon kohteena olevia muotoja, kuten puiden runkoja (Hyyti & Visala 2013, Melander 2018). Ennen kuin sensoriteknologia on mahdollista ottaa operatiiviseen käyttöön, kehitystyötä puiden automaattisen tunnistamisen, puulajitulkinnan sekä runkojen laadun mittauksen osalta vaaditaan (Holopainen ym. 2013, Lindroos ym. 2017). Seuraavissa kappaleissa on käsitelty erikseen mobiililaserkeilaus- ja konenäkötekniikan hyödynnettävyyttä metsäsovelluksissa.

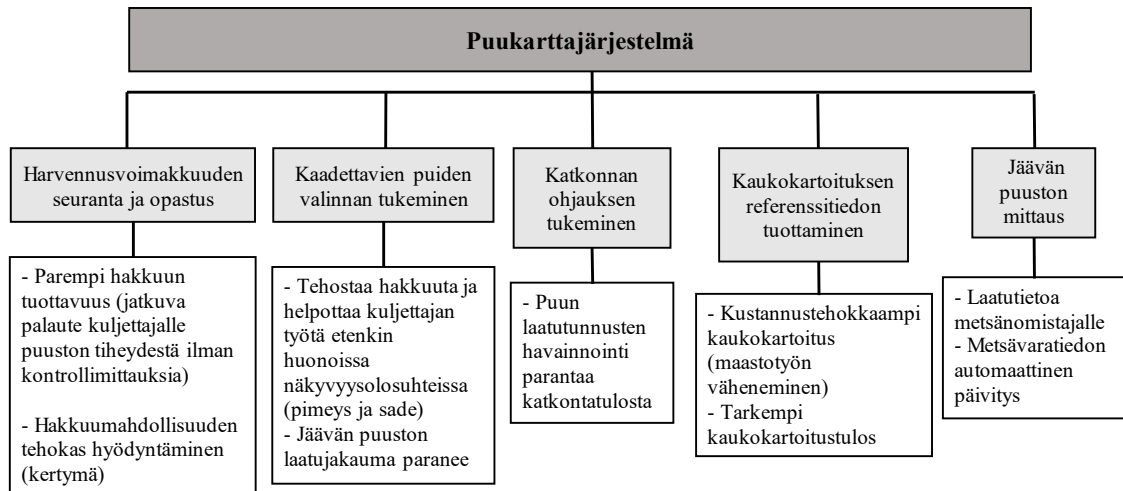
### ***2.3.2 Laserkeilaus***

Laserkeilaus on pistemäisen aineiston tuottamiseen kehitetty kartoitusmenetelmä, jossa jokaiselle havaintojoukon pisteelle saadaan x-, y- ja z-koordinaattitieto. Yksittäiset havaintopisteet muodostavat 3D-mallintamisessa käytettävän pistepilviaineiston. LiDAR (Light Detection and Ranging) on laserkeilaukseen käytettävä mittalaite (kuva 3), joka rekisteröi kohteen ominaisuustietoja laserpulssin lentoajan ja voimakkuuden avulla (Holopainen ym. 2013). Liikkuvasta alustasta, kuten hakkuukoneesta, tehtävää laserkeilausta kutsutaan mobiililaserkeilaukseksi (MLS). Mobiililaserkeilauksessa laserkeilain tuottaa mittaushavainnot samasta kohteesta useista eri suunnista (Öhman ym. 2008). Mobiililaserkeilauksella voidaan tuottaa tietoa puuston kilpailuasemasta, latvuston tilajärjestyksestä, latvusmassasta, oksaisuudesta ja rungon suoruudesta hakkuukoneen läheisyydessä (Murphy 2010).



**Kuva 3.** 3D-laserkeilain asennettuna hakkuukoneen ohjaamon etupuoelle. Kuva on tämän tutkimuksen testihakkuista.

Mobiililaserkeilauksella voidaan tuottaa puukartta, jossa jokaiselle metsikön puulle on määritetty sijainti ja ominaisuustietoja. Puukartasta voidaan selvittää yksittäisen puun sijainti suhteessa hakkuukoneeseen, puiden läpimittoja rungon eri korkeuksilta sekä erilaisia laatu-tunnuksia (lenkous, oksaraja, paksuimman oksan paksuus jne.) (Melkas & Hämäläinen 2015). 2D-laserkeilaimet ovat potentiaalisia sensoreita paikannukseen ja puukartan muodostukseen niiden tarkkuuden ja alhaisen hintatason vuoksi (Billingsley ym. 2008). Melkas ym. (2014) tutkivat 2,5D-laserkeilaimeen ja SLAM-algoritmiin perustuvan puukarttajärjestelmän mahdollisuuksia tehostaa hakkuuta (kuva 4). Harvennuksen jälkeinen runkoluku pystyttiin määrittämään järjestelmällä hyvin, mutta ennen hakkuuta keskimäärin 12 % leimikoiden puista jäi tunnistamatta.



**Kuva 4.** Puukarttajärjestelmästä saatavat hyödyt soveltamisalueittain. Tiedot on koottu Melkkaan ym. (2014) yhteenvetotaulukosta.

Puiden mitta- ja laatu- tietojen määrittäminen pistepilviaineistosta edellyttää sitä, että yksittäiset puut pystytään tunnistamaan. Esimerkiksi Hyyti & Visala (2013) ovat kartoittaneet puustoa segmentoimalla yksittäisiä laserkeilauslinjoja, mikä mahdollisti maasta ja puista heijastuneiden kaikujen erottamisen toisistaan. Yksittäisten puiden rungot tunnistettiin analysoimalla eri keilauskulmilla saatujen paluukaikujen jakaumatietoa. Puun asento ja sijainti saatiin sovittamalla puuta kuvaavaan pistepilveen suora. Puun poikkileikkauksen mallintaminen mahdollisti läpimittojen lukemisen runkojen eri korkeuksilta.

Tutkimus mobiililaserkeilauksen ja puukarttajärjestelmän kehittämiseksi on alkuvaiheessa. Puukarttajärjestelmän tarkkuuden ja soveltuvuuden testaaminen edellyttää ennen kaikkea metsäkoneiden paikannustarkkuuden parantamista (Melkas & Hämäläinen 2015). Toisaalta metsäkoneen sijainti voidaan määrittää suhteessa mitattuihin puihin hyvin tarkasti (Öhman ym. 2007). Metsäkoneiden paikannustarkkuus on ongelma, kun mittaustulos halutaan siirtää yleiseen koordinaattijärjestelmään.

### 2.3.3 Konenäkö

Konenäköjärjestelmät ovat Suomessa jo hyvin tunnettua teknologiaa, sillä konenäkö otettiin käyttöön teollisuudessa jo 1970-luvun alkupuolella sahoilla tukkien lajittelussa (Soini 2018).

Konenäköjärjestelmät koostuvat kameroista, niitä ohjaavasta keskusyksiköstä ja näitä yhdistävästä kaapeloinnista (Pelli 2011). Konenäön avulla voidaan täydentää laserkeilauksella tuotettua aineistoa (Hyyti & Visala 2013).

Konenäköjärjestelmiä käytetään sekä kaksi- että kolmiulotteiseen mallintamiseen. 2D-konenäköjärjestelmät perustuvat kameran matriisikennoihin, jossa kuva muodostuu X-, ja Y-akseleiden suuntaisista pikseleistä (Pelli 2011). Perinteinen tapa tuottaa optisia 3D-kuvia (kohteen syvyystietoa) on stereonäkö, joka perustuu kahden kameran muodostamiin kuvapareihin (Hong ym. 2018). Viime vuosikymmenien aikana ns. infrapunavaloa hyödyntävät syvyyskamerat ovat yleistyneet, jotka perustuvat rakenteellisen valaistuksen -tekniikkaan (engl. structured light) ja Time of Flight -tekniikkaan (ToF) (Hong ym. 2018). Rakenteellisen valaistuksen -tekniikassa kohteeseen valaistaan useita kertoja tunnettu pistekuvio, ja kohteen syvyysinformaatio saadaan analysoimalla takaisin heijastuneita kuvioita (Sarbolandi ym. 2015). ToF-sensori tuottaa syvyystiedon lähettämällä korkeataajuisia infrapuna-aaltoja kuvauksen kohteeseen ja mittaa lähetettyjen ja vastaanottimeen palautuneiden infrapunasäteiden vaihe-eroja jokaiselle pikselille (Sarbolandi ym. 2015). 3D-kuva luodaan yhdistämällä luotu syvyyskuva ja normaali kuva. Syvyyskamerat soveltuvat suoraan kolmiulotteisen tiedon tuottamiseen ilman stereokuvien tulkintaan vaadittavia konenäköalgoritmeja (Pelli 2011).

Käyttämällä kalibroitua 2D-kameraa ja lasermittalaitteen antamaa etäisyystietoa kohteesta, voidaan puun läpimitta määrittää tarkemmin kuin pelkästään laserkeilaimen avulla (Öhman ym. 2007). Esimerkiksi Wang ym. (2013) ovat kehittäneet puiden tunnistusjärjestelmän, joka hyödyntää sekä 2D-laserkeilaintekniikkaa että digitaalikameraa. Spektritiedon ansiosta konenäön avulla on mahdollista tunnistaa myös puulaji (Öhman ym. 2007). Laserkeilaukseen perustuva puulajitunnistus on vaikeaa, sillä pistepilviaineisto ei sisällä kohteiden spektritietoa.

Konenäön hyötypotentialiaalia on tutkittu korjuujäljen seurannassa. Juurinen (2018) selvitti konenäköön perustuvan Trestima -metsämittausjärjestelmän hyödynnettävyyttä ensiharvennusmetsien harvennusvoimakkuuden todentamisessa. Trestima -metsänmittausjärjestelmä perustuu älypuhelimien ominaisuuksien (kamera, konenäkö, tiedonsiirto ja sijaintitieto) ja pil-

vipalvelun hyödyntämiseen. Sovelluksen havaittiin olevan käyttökelpoinen metsikön pohjapinta-alan laskentaan ja erityisesti puulajisuhteiden mittaamiseen. Konenäön hyödynnettävyyttä on tutkittu myös puustovaurioiden tunnistuksessa (Palander ym. 2018). Ajouralta otettujen puustovauriovalokuvien perusteella jäävät puut pystytettiin luokittelemaan (vaurioitunut/vaurioitumaton) oikein 89 %:ssa tapauksia yhdistämällä kuvatulkintaoperaatiot ja logistinen regressioanalyysi.

Teollisten kameralaitteiden huonoja puolia ovat niiden korkea hinta ja matala resoluutio. Hankintakustannuksia ja vaadittavaa laskentakapasiteettia voidaan pienentää käyttämällä harmaasävykameraa, RGB-kameran sijasta (Pelli 2011). Syvyyskameratekniikan huonoja puolia ovat sen alttius sääolosuhteille (lämpötila ja valaistus) ja kameralaitteen likaantumiselle (Melander 2018). Rakenteellisen valaistuksen -tekniikkaan perustuvat sensorit, mutta myös ToF-sensori ovat herkkiä auringon valon aiheuttamalle häiriölle, kun etäisyys kohteen ja mittalaitteen välillä kasvaa (Sarbolandi ym. 2015).

### **3 HARVENNUSHAKKUUTYÖ**

#### **3.1 Harvennuksessa poistettavien puiden valintaperiaatteet**

Puulaji- ja kasvupaikkakohtaiset harvennusmallit määrittävät suositellun harvennusvoimakkuuden. Harvennusmalleissa on esitetty säästettävän puuston määrän tavoiteltu vaihteluväli metsikön valtapituuden ja pohjapinta-alan perusteella (Äijälä ym. 2014). Ensiharvennuksille on annettu suositukset myös harvennuksen jälkeisestä runkoluvusta läpimittaluokittain. Suositukset ohjeistavat säätelämään harvennusvoimakkuutta metsikön ominaisuuksien mukaan harvennusmallien sallimissa rajoissa. Esimerkiksi tiheänä kasvaneissa metsissä jäävä puusto pyritään jättämään harvennusmallin ylärajalle ja sekametsiköissä puusto harvennetaan puolestaan ohjearvojen alarajalle (Metsäteho Oy 2006).

Suomessa käytetyissä valikoivissa harvennustavoissa poistettavien puiden valinta tehdään huomioiden puun laatu ja järeytys (Isomäki & Väisänen 1980). Harvennuksessa poistetaan ensisijaisesti vioittuneet, sairaat ja huonolaatuiset puut (Iittiläinen ym. 2003). Vioittuneiden ja sairaiden puiden kasvukyky on heikentynyt ja ne altistavat metsikön tuhoille. Huonolaatuisten puiden arvokasvu on pientä verrattuna normaaleihin puihin. Suomessa puiden ulkoisia

laatutekijöitä on tutkittu erityisesti männyllä, jolla rungon laatu vaikuttaa merkittävästi puun jalostusarvoon. Männiköiden ensiharvennuksilla jäävän puuston alhaista laatua on todettu selittävän poistettavien puiden vähäiset valikointimahdollisuudet (Kärkkäinen & Uusvaara 1982). Esimerkiksi Stödtin ym. (2003) mittaamissa männikön ensiharvennuksissa ulkoisesti virheettömiksi luokiteltua puita oli kaikista koepuista 53 %.

Onnistunut harvennustulos saadaan tunnistamalla ensin selkeästi poistettavat puut, jonka jälkeen valikoidaan säästettävän puuston kasvua haittaavia puita siten, että harvennustulos pysyy harvennusmallien mukaisissa rajoissa. Esimerkiksi Yhdysvaltojen Wisconsinissa on esitetty puuvalinnan systemaattinen lähestymistapa valtion metsien harvennuksissa, kun halutaan maksimoida laadukkaan tukkipuun tuotanto (Silviculture Handbook 2013). Lähestymistavan mukaan harvennuksessa poistetaan tärkeysjärjestyksessä puut, jotka ovat 1) Riskialttiita luonnolliseen kuolemaan tai niillä ei ole kasvupotentiaalia 2) Haitaksi säästettävälle puulle 3) Latvukseltaan heikkoja 4) Runkomuodoltaan tai laadultaan huonoja 5) Vähemmän haluttua puulajia 6) Tilajärjestyksen kannalta poistettavia. Puuvalintaan vaikuttavien tekijöiden määrä kasvaa metsikön erirakenteisuuden ja korjuuohjeiden lisääntyessä.

## **3.2 Poistettavien puiden valintaan vaikuttavat tekijät**

### ***3.2.1 Puun oksaisuus, runkomuoto ja latvusrakenne***

Oksaisuus on puiden tärkeä laatukriteeri. Erityisesti mäntyrunkojen tukkiosan halutaan olevan mahdollisimman vähä- ja hento-oksaisia (Penttilä ym. 2013). Puiden yleisoksaisuutta voidaan luokitella suhteuttamalla oksien paksuus rungon kokoon, sekä tarkastelemalla oksien pituutta ja oksakulmaa (Kärkkäinen & Uusvaara 1982). Epätasarakenteisissa männiköissä esiintyy usein etukasvuisia ja siksi oksaisia puita. Nämä ns. susipuiksi kutsutut puut tulisi poistaa hakkuussa. Puun yleisoksaisuuden lisäksi puiden laatua voidaan arvioida sen perusteella, miten runko jakautuu oksattomaan tyveen sekä kuivaoksaiseen ja terveoksaiseen rungonosaan. Metsikön tiheyden kasvaessa elävän latvuksen osuus pienenee, ja oksattoman rungon osuus puun kokonaispituudesta kasvaa (Kantola & Pennanen 1999). Puun ikääntyessä kuivaoksainen rungon osa pitenee (Kantola & Pennanen 1999).



Runkomuodon perusteella hakkuussa tulisi säästää solakoita puita. Esimerkiksi pylväiden raaka-aineena käytettävien puiden runkomuodon tulisi olla mahdollisimman sylinterimäinen (Uusitalo 2010). Samassa ikäluokassa läpimitaltaan suuremmat puut ovat runkomuodoltaan huonompia, koska suurten ja siten harvassa kasvaneiden puiden paksuuskasvu keskittyy rungon tyviosaan (Hynynen & Arola 1999). Runkomuodon ja oksikkuuden välillä on riippuvuus, sillä samaa läpimittaluokkaa edustavien puiden oksien on havaittu olevan sitä paksumpia mitä voimakkaammin puu kapenee (Kantola & Pennanen 1999).

Latvussuhde (elävän latvuksen osuus puun kokonaispituudesta) ja latvuksen leveys sekä puun pisin oksa korreloivat negatiivisesti puun yleisen laadun kanssa (Kantola & Pennanen 1999), mutta positiivisesti puun elinvoimaisuuden kanssa. Esimerkiksi männiköiden ensiharvennus tulisi tehdä ennen kuin latvussuhde on laskenut alle 40 prosentin, jotta ylitäheydestä aiheutuvilta merkittäviltä kasvutappioilta vältyttäisiin (Äijälä ym. 2014). Latvukseltaan suurilla ja symmetrisillä puilla on pienempi lumituhoriski (Cameron 2000).

### ***3.2.2 Runkoviat ja sairaudet***

Runkovioiksi voidaan luokitella esimerkiksi puun haaroittumat, mutkat, katkeamat, korot, latvanvaihdot sekä lenkous (Kärkkäinen & Uusvaara 1982, Stödt ym. 2003). Stödtin ym. (2003) mukaan ensiharvennusmänniköiden vioista yleisimpiä ovat oksaisuus, poikaoksaus, mutkaisuus sekä näiden yhdistelmät. Korot, rungon katkeaminen, latvanvaihdot ja haaraisuus ovat puolestaan harvinaisempia. Uusvaaran (1974) mukaan runkomutka, tyvimutka, poikaoksa ja lenkous selittävät jopa 95 % viljelymänniköiden teknisistä vioista. Mutkaisuus, haaraisuus ja lenkous yleistyvät erityisesti maapohjan ravinnepitoisuuden kasvaessa. Puulajeittain tarkasteltuna mutkat ovat yleisiä lehtipuilla, ja lenkoutta eli rungon tasaista käyryyttä esiintyy sekä havu- että lehtipuilla (Keski-Suomen metsäkeskus 1999). Runkovikojen vaikutus puun laatuun riippuu sekä niiden koosta että sijainnista rungossa. Esimerkiksi Uusvaara & Kärkkäinen (1982) ovat luokitelleet korot tyvi- ja runkokoroiksi. Runkoviat eivät vaikuta puun kasvupotentiaaliin positiivisesti, toisin kuin elävien oksien koko ja lukumäärä.

Puiden sairaudesta johtuvia koron aiheuttajia ovat männyllä esiintyvät versoruoste (*Melampsora pinitorqua*), versosurma (*Gremmeniella abietina*) ja tervasroso (*Cronartium flaccidum*, *Peridermium pini*) (Luonnonvarakeskus 2018). Kuusella vakavin puun laatuun vaikuttava sairaus on kuusentyvilaho (*Heterobasidion parviporum*) (Luonnonvarakeskus 2018). Kuusella pitkälle edennyt laho ilmenee puun harsuuntumisena ja/tai rungossa esiintyvinä pihkavuotoina (Piri ym. 2017). Aikaisempien harvennusten huono korjuujälki altistaa metsikön sairauksille ja laatutappioille. Hakkuussa mahdollisesti syntyvät runkovauriot sijaitsevat puun oletetun kaatosahauskohdan yläpuolella (Sirén 1998). Hakkuussa syntyneistä puustovaurioista aiheutuu sekä lahoutumista että koroutumista (Sirén 1998).

### **3.2.3 Puulaji**

Sekapuustoisten metsien hakkuissa pyritään säästämään kasvupaikalle sopivin puulaji (Iittiläinen ym. 2003). Havupuuvaltaisissa metsiköissä suositetaan pääasiassa kasvatettavaa pääpuulajia, mutta viljavalla kasvupaikalla on suositeltavaa säästää myös hyvälaatuisia koivuja ja haapoja sekapuuna (Iittiläinen ym. 2003). Kahden havupuun välisessä valintatilanteessa suositetaan hyvälaatuisia ja -kasvuisia kuusia oksikkaiden mäntyjen sijaan (Iittiläinen ym. 2003). Puulajisuhteissa pitää huomioida myös monimuotoisuuden säilyttäminen. Viime aikoina Suomessa yleistynyt FSC-sertifiointi FSC-STD-FIN-01-2006 edellyttää 10 prosentin lehtipuusuuden säilyttämistä kasvatushakkuissa.

### **3.2.4 Korjuukalusto**

Korjuukaluston ominaisuudet asettavat rajoitteita poistettavien puiden valinnalle. Poistettavien puiden systemaattista valintaa joudutaan tekemään ajourien avauksessa, jolloin optimaalisesta puuvalinnasta joudutaan poikkeamaan (Sirén 1998). Ajourat tulisi sijoittaa mahdollisimman vähäpuustoihin kohtiin (Sirén 1998), mutta toisaalta ajourien sijoittelun tulisi perustua ajouravälin pitämiseen suositusten (Äijälä ym. 2014) mukaisena. Lisäksi vähäpuustoisuus voi olla merkki poikkeuksellisesta ja heikosti kantavasta alueesta, jonka läpi ajamista tulee välttää (Turunen & Ovaskainen 2018). Ajourilta poistettujen puiden menetys tulisi

The figure consists of two line graphs side-by-side, both plotting 'Tiläys, runkoalusta' (mm) on the y-axis (ranging from 400 to 1400) against distance from the edge ('ajoura, 4 m') on the x-axis. The x-axis has markers for 10 m, 6 m, and 0 m. A vertical grey bar at 0 m indicates the edge of the slab.

**Left Graph: Ensiharvennus**

- Legend:**
  - Isot yleiskoneet, ajourien välinen puusto (Solid line with solid squares)
  - Yleiskoneet, ajourien välinen puusto (Dashed line with solid triangles)
  - Harvennuskoneet, ajourien välinen puusto (Dotted line with solid circles)
  - Isot yleiskoneet, ajourien pinta-ala mukana (Solid line with open squares)
  - Yleiskoneet, ajourien pinta-ala mukana (Dashed line with open triangles)
  - Harvennuskoneet, ajourien pinta-ala mukana (Dotted line with open circles)
- Data Trends:** At 10 m and 6 m, all series are relatively flat around 900 mm. At 0 m, there is a sharp increase. The 'Harvennuskoneet, ajourien välinen puusto' series reaches the highest value of approximately 1250 mm. The 'Isot yleiskoneet, ajourien välinen puusto' series reaches approximately 1000 mm. The 'Yleiskoneet, ajourien välinen puusto' series reaches approximately 1050 mm. The 'Isot yleiskoneet, ajourien pinta-ala mukana' series reaches approximately 680 mm. The 'Yleiskoneet, ajourien pinta-ala mukana' series reaches approximately 700 mm. The 'Harvennuskoneet, ajourien pinta-ala mukana' series reaches approximately 850 mm.

**Right Graph: Muu harvennus**

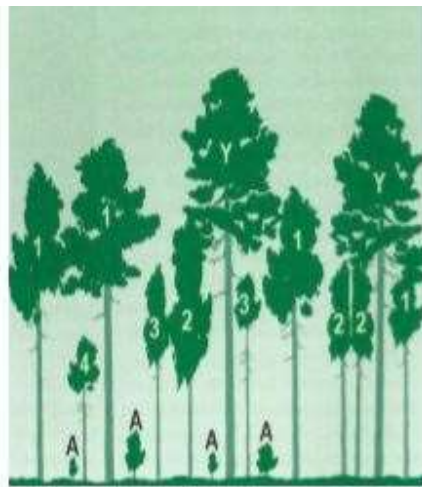
- Legend:** (Same as the left graph)
- Data Trends:** At 10 m and 6 m, all series are relatively flat around 550 mm. At 0 m, there is a sharp increase. The 'Harvennuskoneet, ajourien välinen puusto' series reaches the highest value of approximately 850 mm. The 'Isot yleiskoneet, ajourien välinen puusto' series reaches approximately 750 mm. The 'Yleiskoneet, ajourien välinen puusto' series reaches approximately 800 mm. The 'Isot yleiskoneet, ajourien pinta-ala mukana' series reaches approximately 520 mm. The 'Yleiskoneet, ajourien pinta-ala mukana' series reaches approximately 550 mm. The 'Harvennuskoneet, ajourien pinta-ala mukana' series reaches approximately 580 mm.

Gellerstedtin (2002) mukaan ajourien lisäksi puuvalintaan vaikuttavia korjuuteknisiä seikkoja ovat hakkuukoneen sijainti suhteessa ympäröivään puustoon, työmaalla esiintyvät esteet sekä työmaaolosuhteet kuten kantavuus ja kaltevuus. Optimaalisesta puuvalinnasta voidaan joutua poikkeamaan, jos poistettavan puun ja hakkuukoneen väliin jää säästettäväksi tarkoitettu puu. Hakkuukoneen nosturin tyven ja poistettavan puun rungon väli tulee olla esteetön, minkä takia edellisessä tilanteessa kuljettajalla ei ole muuta vaihtoehtoa kuin hakata myös säästettäväksi tarkoitettu puu (Grimm 2015).

### 3.2.5 Hakkuuperiaate

Poistettavien puiden valintaan vaikuttaa tavoitteet hakkuukertymästä sekä tulevista harvennus- ja päätehakkuutuloista. Tästä syystä harvennushakkuun toteutukseen on luotu toisistaan

poikkeavia harvennusperiaatteita, joiden avulla määritetään se, minkälaisia puita harvennuksessa suositaan (Hynynen & Huuskonen 2014). Metsikön puut voidaan jakaa pituusluokittain eri latvuserroksiin, joihin kuuluvia puita käsitellään sovelletun harvennusperiaatteen mukaan. Latvuserroksittain tarkasteltuna puut voivat olla joko päävalta-, lisävalta-, väli-, alus- tai alikasvospuita (kuva 6). Pelkästään latvuserroksiin perustuvia hakkuuperiaatteita ovat ala- ja yläharvennus. Näiden lisäksi on olemassa yläharvennusperiaatetta mukaileva laatuharvennus.



#### Vallitsevat latvuserrokset:

##### 1. Päävaltapuut (LK 1)

- Metsikön ylin latvuserros
- Pisimmät puut

##### 2. Lisävaltapuut (LK 2)

- Latvukset heikomminkin kehittyneet kuin päävaltapuiden
- Puiden pituus noin 80–90% päävaltapuiden pituudesta (Ilvessalo 1929)

#### Vallitut latvuserrokset:

##### 3. Välipuut (LK 3)

- Puiden pituus noin 80–70% päävaltapuiden pituudesta
- Puut enimmäkseen valtapuiden välissä
- Käršivät sivuvarjostuksesta

##### 4. Aluspuut (LK 4)

- Alin latvuserros
- Käršivät sekä ylä- että sivuvarjostuksesta
- Puiden pituus noin 70–60% päävaltapuiden pituudesta

A=alikasvos Y=ylihuiput  
(Ilvessalo 1929)

**Kuva 6.** Puuston latvuserrokset. Alikasvospuut ovat ainespuun mitat alittavia puita, jotka yleensä haittaavat hakkuutyön suoritusta (Kuitto ym. 1994). (kuva: Valkonen 2005).

Alaharvennus soveltuu kaikentyyppisten metsiköiden harvennukseen (Hynynen & Huuskonen 2014). Alaharvennuksessa suositaan hyvälaatuisia päävaltapuita ja säästetään lisävaltapuita paikkoihin, joissa puulle on tarpeeksi kasvutilaa (Iittiläinen ym. 2003). Vastaavasti poistettavat puut ovat kilpailussa häviölle jääneitä väli- ja aluspuita sekä latvukseltaan supistuneita lisävaltapuita (Iittiläinen ym. 2003). Alaharvennuksessa latvuserros on tyypillisesti

puuvalintaa enemmän ohjaava tekijä kuin puun laatu (Päivänen & Taipale 1981). Yläharvennus soveltuu vain tasaikäisten ja hyvin hoidettujen mänty- ja kuusimetsien toiseen ja kolmanteen harvennukseen (Äijälä ym. 2014). Yläharvennuksessa poistetaan terveitä päävaltapuita siten, että jäljelle jää riittävästi hyvälaatuisia lisävaltapuita (Hynynen & Huuskonen 2014). Laatuharvennuksessa puuvalinta tehdään mukaillen yläharvennuseriaa siten, että kaikin suurimpia ja siten paksuoksaisia puita sekä muilta laatuominaisuuksiltaan huonoja puita poistetaan (Hynynen & Huuskonen 2014).

### ***3.2.6 Puuvalinnan tekevä henkilö***

Metsänhoitosuosituksen tulkinnanvaraisuudesta johtuen poistettavien puiden valinta ei ole yksimielistä (Ramos 2016). Eri metsätyöntekijöiden, kuten metsätoimihenkilön ja metsurin, tai metsätyöntekijän ja hakkuukoneenkuljettajan tekemää puuvalintaa samassa päätöksentekotilanteessa on tutkittu ennakkokeinon avulla.

Alaharvennuksessa poistettaviksi puiksi valitaan keskimäärin useammin samat puut kuin yläharvennuksessa (Ramos 2016) ja puuvalinnan yksimielisyys on suurempi harvinaisten puulajien osalta (Grimm 2015). Eroja puuvalinnassa voi selittää se, että puuvalinta joudutaan tekemään usein kahden ei-optimaalisen vaihtoehdon välillä (Päivänen & Taipale 1981). Kahden puun välisessä valintatilanteeseen päätöksentekoon vaikuttavat rungon teknisten laatuominaisuuksien lisäksi puun järeys ja latvuksesta saatava tieto puun yleisestä kasvatuskelpoisuudesta.

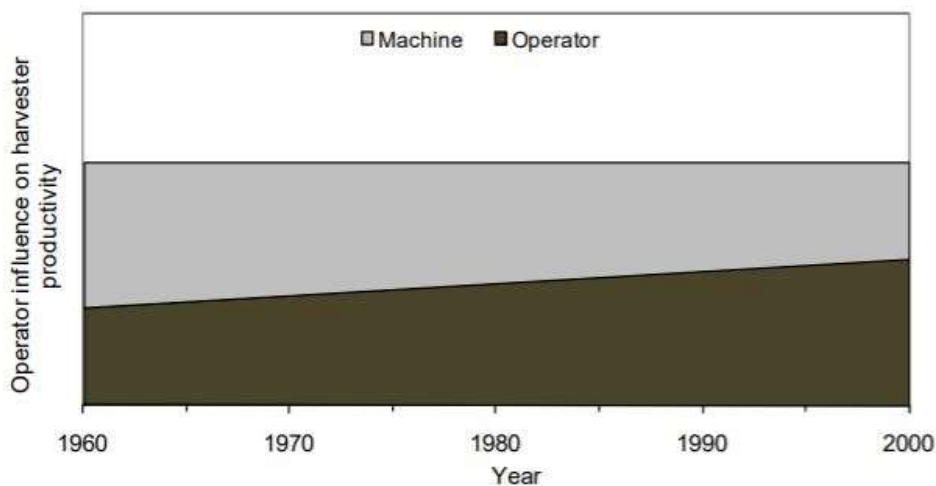
## **3.3 Hakkuukoneenkuljettajan merkitys harvennushakkuussa**

### ***3.3.1 Hakkuukonetyön luonne***

Hakkuukonetyö on haastavaa, sillä kuljettajalla on useita eri vastuualueita hoidettavanaan. Kuljettaja vastaa työn tuottavuudesta, puuvalinnasta, ajouraverkoston suunnittelusta, puutavarannan mittauksesta, koneen huolloista, apteerauksesta sekä yhteydenpidosta moniin sidosryhmiin (Sirén 1998). Hakkuukoneen toiminta on lähes täysin riippuvainen kuljettajan antamista ohjausliikkeistä. Työn näkyvä tulos syntyy metsäkoneen ja kuljettajan muodostaman koko-

naisuuden toiminnan kautta (Tynkkynen 2001 viitattu Kariniemi 2006). Suoriutuakseen työstään kuljettajalta edellytetään monipuolista osaamista ja tehokasta päätöksentekokykyä (Väättäinen ym. 2005).

Kuljettajien väliset tuottavuuserot ovat suuria. Nopeimmat kuljettajat voivat olla jopa kaksi kertaa tuottavampia kuin hitaimmat kuljettajat toimittaessa vastaavassa ympäristössä samankaltaisilla hakkuukoneilla (Rajamäki ym. 1996). Kokeneidenkin kuljettajien välillä on havaittu jopa 40 %:n vaihtelua tuottavuudessa käytettäessä samaa konemallia (Kärhä ym. 2004). Ovaskaisen ym. (2004) mukaan kuljettajasta johtuva hakkuutyön tuottavuuden vaihtelu selittyy erilaisilla hakkuutekniikoilla, motorisilla taidoilla, työn suunnittelulla, työkokemuksella, poistettavien puiden hakkuujärjestyksellä ja työpisteessä tehtävien päätöksentekoprosessien laadulla. On arvioitu, että tuottavien kuljettajien tuottavuudesta jopa 50–55 % johtuu paremmasta suunnittelusta ja päätöksenteosta (Väättäinen ym. 2004). Erot kuljettajien välisessä tuottavuudessa korostuvat olosuhteiden vaikeutuessa (Väättäinen ym. 2004) ja toimittaessa suurilla koneilla (Asikainen ym. 2005). Myös yksittäisen kuljettajan suorituskyky voi vaihdella voimakkaasti sekä eri työpäivien välillä että työpäivän sisällä (Purfürst & Erler 2011). Hakkuukoneenkuljettajan merkitys hakkuutyössä on historiallisesti korostunut (kuva 7).



**Kuva 7.** Kuljettajasta on kehittynyt hakkuukonetta merkittävämpi hakkuutyön tuottavuutta selittävä tekijä. (kuva: Ovaskainen 2009).

Hakkuutyön vaativuus näkyy myös siinä, että korjuujäljen vaihtelun on havaittu olevan suurta (Sirén 1998). Hakkuutyön rinnalla kuljettaja joutuu tarkkailemaan jatkuvasti työn laatua, kuten harvennusvoimakkuutta ja hakkuukoneen liikkumiseen käytettävää tilaa. Hyvän korjuujäljen saavuttaminen edellyttää kuljettajalta oikeaa asennetta, sekä riittävää tietoa ja taitoa (Rieppo & Kariniemi 2001). Hakkuutyön laatu ja tuottavuus eivät ole toistensa pois-sulkevia tekijöitä, sillä tuottaville kuljettajille on tyypillistä myös hyvä korjuujälki (Sirén 1998).

Hakkuukoneenkuljettajan työssäoppimisaika on pitkä, ja kuljettajan pääasiallinen keino parantaa taito- ja tietotasoaan on tekemällä ja kokeilemalla oppiminen (Ylimäki ym. 2012). Gellerstedtin (2002) mukaan harvennuksilla täyden ammattitaidon saavuttaminen vaatii keskimäärin jopa viiden vuoden kokemuksen hakkuukonetyöskentelystä. Kuljettajan työkokemukseen liittyy keskeisesti hiljainen tieto, joka kuvaa työssä opittuja tehokkaita toimintatapoja eri tilanteissa (Väättäinen ym. 2005).

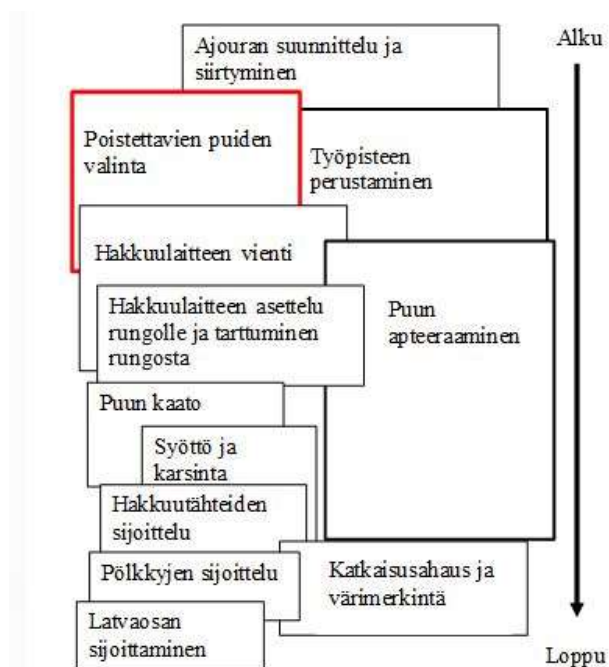
Vastuu harvennuksen tehokkaasta ja laadukkaasta toteutuksesta sekä työn edellyttämä jatkuva tarkkaavaisuus altistavat kuljettajan henkiselle rasitukselle. Työn korkean psyykkisen kuormituksen aiheuttaa erityisesti lukuisten päätösten tekeminen samanaikaisesti nopean työtahdin ja nosturin tarkan käsittelyn kanssa (Kariniemi 2006). Henkisen rasitustilan vallitessa kuljettajan kyky hallita tehtäväkokonaisuuksia heikkenee, suoritus hidastuu ja virheiden määrä lisääntyy (Kariniemi 2006). Kuljettajan kyky suoriutua hakkuutyöstä riippuu myös kuljettajan vireystilasta. Nichollsin ym. (2004) mukaan kuljettajan työtahti alenee työvuoron lopussa. Kuljettajat kokevat vireystilan laskun olevan yksi hakkuutyön keskeinen ongelma (Ylimäki ym. 2012).

### ***3.3.2 Hakkuukoneenkuljettajan puunvalintaprosessi***

Hakkuutyössä kuljettajan ajattelu- ja suunnittelutyö kohdistuu Kariniemen (2006) mukaan kolmelle eri hierarkiatasolle, joita ovat työympäristö, työnäkemä ja työpiste. Työympäristö on yhden tai useamman leimikon muodostama kokonaisuus, kun taas työnäkemä koostuu useammasta leimikolla sijaitsevasta työpisteestä. Kuljettajan puunvalinta ja poistettavien pui-

den hakkuutyö toteutetaan työpisteessä. Työpisteessä puuvalinta aloitetaan ajouralla sijaitsevista puista, joiden hakkuun aikana kuljettaja tekee päätöksen uran lähettäviltä poistettavista puista (Gellerstedt 2002). Harvennuksen edetessä näkyvyys paranee, jolloin päätöksenteko etenee koskemaan urasta kauempana olevia puita. Kuljettaja muodostaa mielessään hakattaville puille työjärjestyksen (Kariniemi 2006). Kuljettajan tekemä puuvalinta voi muuttua harvennustyön edetessä hakkuussa syntyneiden korjuuvaurioiden takia. Usein korjuuvaurio syntyy työpisteen muutaman ensimmäisen puun hakkuun aikana, koska tällöin puun kaatoon käytettävää tilaa on vähiten (Moilanen 2018).

Kuljettajan tekemää puuvalintaa vaikeuttaa se, että poistettavien puiden valintaa tehdään rinnakkain muun suunnittelutyön ohella (kuva 8). Kuiton ym. (1994) mukaan poistettavien puiden valintaa tehdään siirtymisten ja hakkuulaitteen viennin aikana. Väätäisen ym. (2004) mukaan puuston latvus- ja runkotason havainnointiin (mikä liittyy mm. poistettavan puun valintaprosessiin) kuluu noin 10 % tehotyöajasta. Hakkuulaitteen viennin aikana kuljettajan huomio on kohdistettu pääasiassa poistettavan puun rungon arviointiin sekä puiden runko- ja latvustasojen tarkkailuun. Monipuolisinta havainnointi on hakkuukoneen siirtymisen aikana (Sirén 1998).



**Kuva 8.** Päätös poistettavista puista syntyy rinnakkain muun suunnittelun ja päätöksenteon kanssa. Samaan aikaan kuljettaja suorittaa siirtymiseen ja puomin liikuttamiseen liittyviä toimintoja. (kuva: Gellerstedt 2002, muokattu).



### ***3.3.3 Harvennusvoimakkuuden ja puuvalinnan hallinta***

Kuljettaja pystyy seuraamaan harvennusvoimakkuuden toteutumista ja säätelemään toimintaansa omavalvontamittausten perusteella. Metsäteho Oy:n (2006) laatiman kuljettajan korjuuoppaan mukaan harvennusvoimakkuuden mittaaminen tehdään jatkuva-aikaisesti hakkuutyön ohessa ja kasvatettava puusto määritellään työpistekohtaisesti. On huomattava, että Hokka & Räsänen (2000) totesivat jäävän puuston runkoluvun arvioinnin tuottavan kuljettajalle vaikeuksia. Kuljettajalle voidaan antaa myös lisäohjeista suositellusta/toivotusta harvennusvoimakkuudesta (Poikela & Äijälä 2006), jolloin harvennusmalleja on pystyttävä soveltamaan.

Kuljettajalla ei ole keinoja varmistaa oikeaa puuvalintaa. Hakkuutyössä puun laadun arviointi on kuljettajalle haastavaa (Loponen 2018). Metsäympäristön havainnoiminen on vaikea tehtävä, sillä metsässä valaistusolosuhteet muuttuvat, ja näkyvyyttä haittaavat alikasvos, pieniläpimittaiset puut, sekä kasvatettavien puiden oksat. Talviaikaan havainnoimista haittaa puut peittävä lumipeite, minkä lisäksi aikaisin aamusta ja myöhään illasta työtä on tehtävä lähes täydellisessä pimeydessä (Billingsley ym. 2008). Riittämättömissä valaistusolosuhteissa puiden yksityiskohdat nähdään epäterävinä, värien näkeminen vaikeutuu, ja havainnointi hidastuu (Rieppo & Kariniemi 2001). Puustoa on tarkasteltava useiden metrien etäisyydeltä metsäkoneen ohjaamosta, mikä vaikeuttaa puiden laadun arviointia. Hakkuukoneen siirtäminen siksi, että puun laatua voidaan tarkkailla eri suunnista, ei ole kustannustehokasta (Grimm 2015).

Sopivan harvennusvoimakkuuden toteutumista on vaikea hallita. Esimerkiksi Ylimäen ym. (2012) mukaan 46,8 % puunkorjuuryrittäjistä kokee, että epätasainen tai liian voimakas/vähäinen runkopoistuma harvennuksella on hyvin tai erittäin merkittävä ongelma. Korjuujäljen tarkastukset soveltuvat keskimääräisen harvennusvoimakkuuden todentamiseen ja palautteen antamiseen kuljettajalle. Puuvalinnan onnistumista ei voida mitata hakkuun jälkeen, sillä hakattujen puiden ominaisuuksista ei ole olemassa tarkkaa tietoa. Ainoa tapa varmistaa kuljettajan onnistunut puuvalinta on hakkuutyön aikainen seuranta, jossa leimikon käsittelemättömän osan puuston laatua verrataan leimikon hakatun osan puuston laatuun (Iittiläinen ym. 2003).

## 4 KONEELLISEN PUUNKORJUUN AIKA- JA TUOTTAVUUSTUTKIMUS

### 4.1 Aika- ja tuottavuustutkimuksen soveltamiskohteet

Yleisimmät koneellisen tavaralajimenetelmän puunkorjuuta käsittelevät metsätyöntutkimukset voidaan jakaa aika- ja tuottavuustutkimuksiin. Tyypillisesti aikatutkimuksessa luokitellaan hakkuutyön eri työvaiheita, ja mitataan niihin kuluva aikaa. Tuottavuustutkimuksissa puolestaan laaditaan tuottavuusmalleja erilaisiin käyttötarpeisiin. Aika- ja tuottavuustutkimus tehdään yleensä samassa yhteydessä, sillä tieto työn vaatimasta ajasta on perusedellytys erilaisille tuottavuuslaskelmille (Björheden 1991).

Koneellisen puunkorjuun ajanmenekkiä ja sen rakennetta on selvitetty useissa eri tutkimuksissa (esim. Rajamäki ym. 1996, Ligné ym. 2005, Kariniemi 2006, Nurminen ym. 2006, Bergström ym. 2007, Pajkoš ym. 2018), mutta myös hakkuukonetyön tuottavuustutkimusta on tehty runsaasti (esim. Kuitto ym. 1994, Sirén & Aaltio 2003, Kärhä ym. 2004, Malinen ym. 2018). Puunkorjuun aika- ja tuottavuustietoa tarvitaan myös muihin kuin tutkimustarkoituksiin. Suomessa 1990-luvulla aika- ja tuottavuustutkimus oli osa pysyväksi käytännöksi tarkoitettua vuosittaista maksuperustetutkimusta (Kuitto ym. 1994). Työn kirjoitushetkellä Metsäteho Oy on tekemässä korjuun ajanmenekkimallien päivitys- ja kehitystyötä puunkorjuun kustannusten ja tuottavuuden seurantaan.

Hakkuukonetyön tuottavuuteen vaikuttavia tekijöitä selvitetään aika- ja tuottavuustutkimuksilla. Koneellisen tavaralajimenetelmän puunkorjuun tutkimuksissa tuottavuuteen ja ajanmenekkiin vaikuttavia tekijöitä hakkuukoneelle ovat muun muassa konetyyppi, puiden tilavuus ( $m^3$ ), puuston tiheys, puulaji, maaston ominaisuudet, korjuuolosuhteet, hakkuutapa, työohjeistus, puutavaralajien lukumäärä ja alikasvos sekä kuljettaja (esim. Kuitto ym. 1994, Sirén & Aaltio 2003, Kärhä ym. 2004, Nurminen ym. 2006, Eriksson & Lindroos 2014). Runkokohtaisesti tuottavuuteen vaikuttavat puun ottokulma ja ottoetäisyys (Sirén 1998). Kuljettajan on katsottu olevan puun tilavuuden kanssa tärkein hakkuukonetyön tuottavuutta selittävä tekijä (Purfürst & Erler 2011) ja esimerkiksi metsikön rakennetta oleellisempi muuttuja (Ovaskainen 2009). Tästä huolimatta tuottavuustutkimuksissa kuljettajan rooli on usein sivuutettu toisarvoisena (Purfürst & Erler 2011). Tämän voidaan katsoa johtuvan osaltaan siitä,

että eri kuljettajien taitotason vaihtelu on suurta ja vaikeasti mallinnettavissa (Purfürst & Erler 2011). Kuljettajan suunnittelu- ja valmistelutyöhön kuluva ajanmenekki on vaikeasti mitattavissa.

Pääsääntöisesti hakkuutyön tuottavuutta ja ajanmenekkiä selvitetään kokeellisilla tutkimuksilla, mutta aika- ja tuottavuustutkimusta on mahdollista tehdä myös simulaatiosovellusten avulla (esim. Ovaskainen ym. 2004). Hakkuukoneen automaattisesti keräämät mittaustiedot tarjoavat mahdollisuuden hakkuutyön tuottavuuden kustannustehokkaaseen mallintamiseen (Purfürst & Erler 2011). Metsäkoneiden tietojärjestelmät mahdollistavat myös esimerkiksi sijaintitiedon hyödyntämisen aika- ja tuottavuustutkimuksessa (Olivera ym. 2016). 2000-luvulla aikatutkimusta on alettu hyödyntämään kuljettajatutkimuksessa ja videotekniikka on tullut aikatutkimuksen menetelmäksi maastotietokoneiden rinnalle (Palander ym. 2013).

Aikatutkimuksen toteutustapoja ovat esimerkiksi vertaileva tutkimus, korrelaatiotutkimus tai näiden kahden yhdistelmä (Nurminen ym. 2006). Vertailututkimuksessa selvitetään eroja esimerkiksi kahden tai useamman konemallin, työmenetelmän tai kuljettajan välillä (Nurminen ym. 2006). Vertailututkimus perustuu työkuukustannuksen ja ajanmenekin väliseen yhteyteen (Björheden 1991), mikä mahdollistaa vertailtavista kohteista kustannustehokkaimman vaihtoehdon tunnistamisen. Aikatutkimuksen tuloksena saatavien tuottavuusmallien avulla voidaan tehdä kustannuslaskelmia (Kuitto ym. 1994). Tuottavuusmallit auttavat löytämään uusia ja tehokkaita työmenetelmiä, optimoimaan kokonaisia puunkorjuuoperaatioita tai kehittämään tehokkaampia konemalleja (Nurminen ym. 2006). Tuottavuusmalleilla aikatutkimuksen tulokset konkretisoidaan vastaamaan työn tuottavuutta ja kustannuksia kuvaavia mittayksiköitä. Puunkorjuussa tuottavuusmallit ilmaisevat yleensä hakkuutyön tuotoksen ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) suhteessa rungon kokoon.

## **4.2 Työvaiheluokittelu aikatutkimuksessa**

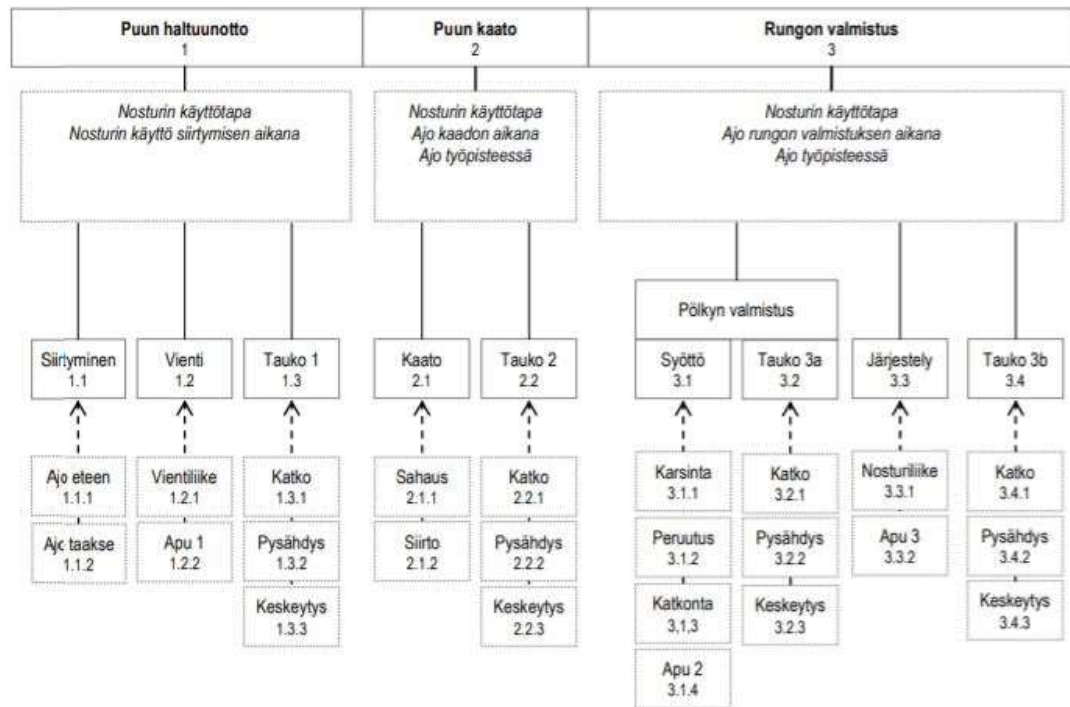
Aikatutkimuksessa määritellään, mitä eri hakkuutyön toimintoja mitataan ja miten nämä toiminnot luokitellaan työvaiheiksi. Työväiheluokittelun avulla voidaan keskittyä niihin olosuhdetekijöihin, joilla on vaikutusta tarkasteltavan työvaiheen ajanmenekkiin (Kuitto ym. 1994). Yksittäisten työvaiheet muodostavat työsyklin, jonka sisällä päätyövaiheet seuraavat

toisiaan aina samassa järjestyksessä. Työvaiheluokittelussa käytettävien työvaiheiden lukumäärä ja sisältö vaihtelevat tutkimuksen käyttötärpeiden ja tutkimusasetelman mukaan. Esimerkiksi Rajamäki ym. (1996) ovat jakaneet hakkuukonetyön kuuteen ja Nurminen ym. (2006) yhdeksään eri työvaiheeseen. Ovaskainen ym. (2004) ovat puolestaan jaotelleet hakkuutyön viiteen eri työvaiheeseen.

Hakkuutyön päätyövaiheita ovat puun haltuunotto, puun kaato ja rungon valmistaminen (Kariniemi ja Vartiainen 2010). Päätyövaiheista ei ole aina käytetty samoja nimityksiä tai määritelmiä. Esimerkiksi monitoimiosan (hakkuulaitteen) vienti ja puun kaato voi olla yksi päätyövaihe (Kuitto ym. 1994), joka on puun haltuunoton ja kaadon yhdistelmä. Puun kaatosahaus voidaan yhdistää hakkuulaitteen vientiin (Kariniemi 2006) tai puun kaatoon (Nurminen ym. 2006). Rungon valmistaminen voi päättyä viimeiseen katkaisusahaukseen (Nurminen ym. 2006), latvaosan tiputtamiseen (Kärhä ym. 2004) tai hakkuulaitteen pystyyn nostoon (Väätäinen ym. 2005). Tässä työssä rungon valmistuksesta käytetään lyhyesti termiä prosessointi (engl. processing).

Kaikki työvaiheet eivät ole välttämättömiä, jotta yksittäisen puun kaataminen ja valmistaminen tavaralajeiksi on mahdollista. Hakkuukoneella siirtyminen tarvitsee tehdä vasta silloin, kun poistettavien puiden hakkaaminen edellyttää eteen- tai taaksepäin ajamista. Muita vastaavia ajanmenekitekijöitä ovat esimerkiksi alikasvoksen raivaus (tai poisto), puomin tuonti eteen, puutavarapölkkyjen kasaaminen, oksien ja hakkuutähteiden siirtely ja keskeytykset (Ovaskainen ym. 2004). Puomin tuontia eteen ei ole yleensä luokiteltu omaksi työvaiheeksi vaan sisällytetty apuaikaan, joka on mm. Rajamäen ym. (1996) käyttämä termi. Järjestelytyöt ja häiriöt voidaan puolestaan luokitella yhdeksi työvaiheeksi (Kariniemi 2006).

Aikatutkimuksessa työvaiheita voidaan priorisoida ja jakaa hierarkiatasaille (kuva 9), koska eri toiminnot voivat tapahtua samanaikaisesti. Hakkuulaitteen vienti ja työpistesiiirtyminen tai puun kaato ja ajaminen voivat tapahtua samanaikaisesti. Edellä kuvatuissa tilanteissa voidaan huomioda esimerkiksi ainoastaan työpistesiiirtymä ja puun kaato.



**Kuva 9.** Hakkuutyön pää- ja osatyövaiheet kuvattuina eri hierarkiatasoin. Työvaiheluokittelussa on huomioitu StanForD:n (Skogforsk 2019) ajanseurannan jaottelu. (kuva: Kariniemi & Vartiamaa 2010).

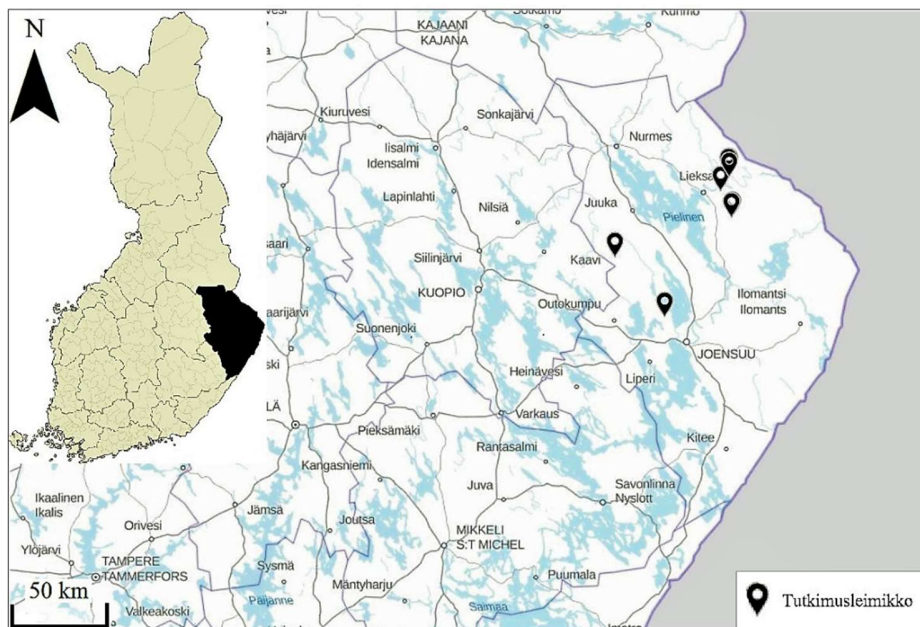
Työnvaiheittaisen aikatutkimuksen tuloksena saadaan työnvaiheittaiset ajanmenekit, jotka ilmoitetaan yleensä suhteellisina arvoina kokonaisajanmenekistä. Työnvaiheittaisten ajanmenekkien summana saatava kokonaisajanmenekki voidaan jakaa teho- ja käyttöajanmenekkiin (Kuitto ym. 1994). Rajamäen ym. (1996) mukaan käyttöajanmenekki saadaan, kun tehoajanmenekkiin lisätään alle 15 minuutin keskeytysajat ja alikasvoksen raivaus. Keskeytykset voivat johtua esimerkiksi korjaus-, lepo- tai huoltoajoista sekä työn suunnitteluun kuluva ajasta (Kuitto ym. 1994). Se, huomioidaanko keskeytyksiin kuluva aika, riippuu pitkälti tutkimusasetelmasta, toisin sanoen aineiston keruun aikajänteestä.

## 5 AINEISTO JA MENETELMÄT

### 5.1 Tutkimuksessa käytetyt aineistot

#### 5.1.1 Tutkimusleimikot

Tutkimusaineisto kerättiin elo-syyskuussa 2018 nuorista ja varttuneista kasvatusmetsistä Pohjois-Karjalan maakunnassa (kuva 10). Tutkimusleimikot koostuivat aikaisemmin harvennetuista ja harventamattomista kivennäismaakohteiden metsiköistä. Tutkimusleimikoita oli yhteensä kahdeksan kappaletta, jotka jakautuivat puoliksi ensiharvennusleimikoihin ja toisiin harvennusleimikoihin.



**Kuva 10.** Tutkimusleimikoiden maantieteellinen sijoittuminen. Kuvasta eivät erotu ne yksittäiset leimikot, jotka sijaitsivat alle kilometrin etäisyydellä toisistaan.

Tutkimusleimikoiksi valittiin ensisijaisesti männiköitä eli metsiköitä, joissa pohjapinta-alalla mitattuna pääpuulaji oli mänty. Ainoastaan yhdellä ensiharvennusleimikolla pääpuulaji oli koivu (taulukko 1). Männiköissä esiintyi vaihteleva määrä kuusta ja koivua sekapuuna. Muista puulajeista yksittäisiä haapoja havaittiin yhdellä ensiharvennusleimikolla. Kasvupaikkatyypeittäin leimikot jakautuivat kuivahkoon kankaaseen (6 kpl) ja tuoreeseen kankaaseen (2 kpl). Leimikoiden keski-ikä oli 42,8 vuotta. Leimikoiden kokonaishakkuupinta-ala oli yhteensä 9,98 ha (ensiharvennus 3,91 ha ja toinen harvennus 6,07 ha). Keskimääräinen

hakkuupinta-ala yksittäisellä leimikolla oli ensiharvennuksella 0,98 ha ja toisella harvennuksella 1,52 ha. Hakkuupinta-alojen laskentaan käytettiin Melkkaan ym. (2018) kehittämää kuviointialgoritmia.

**Taulukko 1.** Tutkimusleimikoiden kuvailutiedot. Leimikoiden lähtötiheydet on laskettu korjuujälkimittauksen sekä hakkuupinta-aloista ja hakkuukonetiedoista johdetun poistuman summana.

Leimikko*	Kasvupaikkatyyppi	Ikä, v	Pääpuulaji	Runkoluku ennen harvennusta, r/ha	Hakkuupinta-ala, ha
A_EH1	kuivahko kangas	35	mänty	1720	1,18
A_EH2	tuore kangas	27	koivu	1380	0,69
A_HH1	kuivahko kangas	50	mänty	740	1,95
B_EH1	kuivahko kangas	37	mänty	1530	0,76
B_HH1	kuivahko/tuore kangas	48	mänty	900	1,58
B_HH2	kuivahko kangas	52	mänty	750	1,26
C_EH1	tuore kangas	35	mänty	1880	1,28
D_HH1	kuivahko kangas	58	mänty	630	1,28

\*A/B/C/D = Kuljettaja, EH/HH = Ensiharvennus / Toinen harvennus, 1/2 = Leimikon järjestysnumero

Tutkimusleimikoiden sisäinen vaihtelu puusto- (mm. runkoluku) ja metsikkötunnusten (esim. kasvupaikkatyyppi) suhteen otettiin huomioon siten, että eri käsittelyvaihtoehdoissa voitaisiin tehdä mahdollisimman samankaltaiset koealat. Leimikkotasolla työmaaolosuhteiden vakioimisen tarkoitus oli se, että ainoa tekijä, joka vaikuttaa käsittelyvaihtoehdon lisäksi kuljettajan tuottavuuteen, on puun tilavuus. Samaa hakkuutapaa edustavat tutkimusleimikot saivat poiketa työmaaolosuhdetekijöiden suhteen. Tutkimusleimikot oli ennakkoraivattu siltä osin, kun alikasvos haittasi hakkuukoneen työskentelyä.

### 5.1.2 Kalusto ja kuljettajat

Tutkimuksessa käytettiin kolmea erilaista keskiluokan harvesteria. Hakkuu tehtiin ajouramenetelmällä, jossa hakkuukone hakkaa poistettavat puut tekemiltään ajourilta. Hakkuukoneiden nosturin puomin ulottuma oli oltava vähintään 10 metriä, jotta hakkuu voitiin toteuttaa noudattaen suositusten (Äijälä ym. 2014) mukaista 20 metrin ajouraväliä. Aikatutkimusmateriaalin keruutarpeita varten kaluston oli oltava varusteltu pyörivällä ohjaamolla. Kriteerien perusteella valitut hakkuukoneet olivat Ponsse Scorpion King, Komatsu 931.2 ja John Deere 1170E.

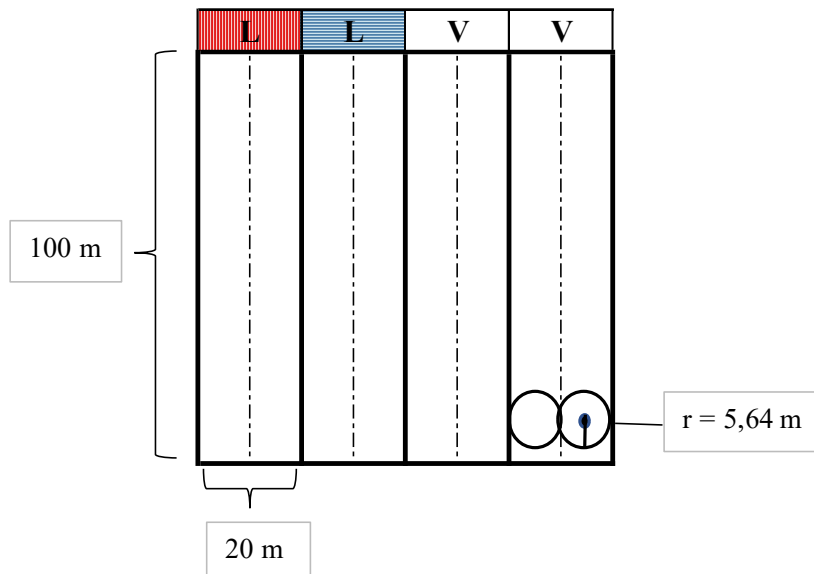
Tutkimukseen otettiin mukaan ammattikuljettajia, joilta edellytettiin yli vuoden työskentelyä hakkuukonetyön parissa. Myös aikaisemmissa tutkimuksissa kokeneiksi kuljettajaksi on laskettu ne henkilöt, jotka ovat työskennelleet vähintään vuoden tavaralajimenetelmän koneilla (Purfyrst & Erler 2011). Rajaukseen päädyttiin, koska työn tilaaja oli halukas selvittämään ennakkoleimauksen hyötyjä kokeneilla kuljettajilla. Kuljettajia oli yhteensä neljä kappaletta (A–D). Kuljettajien keski-ikä oli 39 vuotta ja keskimääräinen työkokemus hakkuukonetyöstä 18,75 vuotta. Tutkimuksessa kuljettajat käyttivät hakkuukonetta, jolla he normaalistikin työskentelivät. Kaikkien kuljettajien perehdytys tutkimusta varten tehtiin vähintään viikko ennen kokeita. Hakkuukone- ja kuljettajatiedot on eritelty liitteessä 1.

## **5.2 Hakkuukoealojen valmistelu**

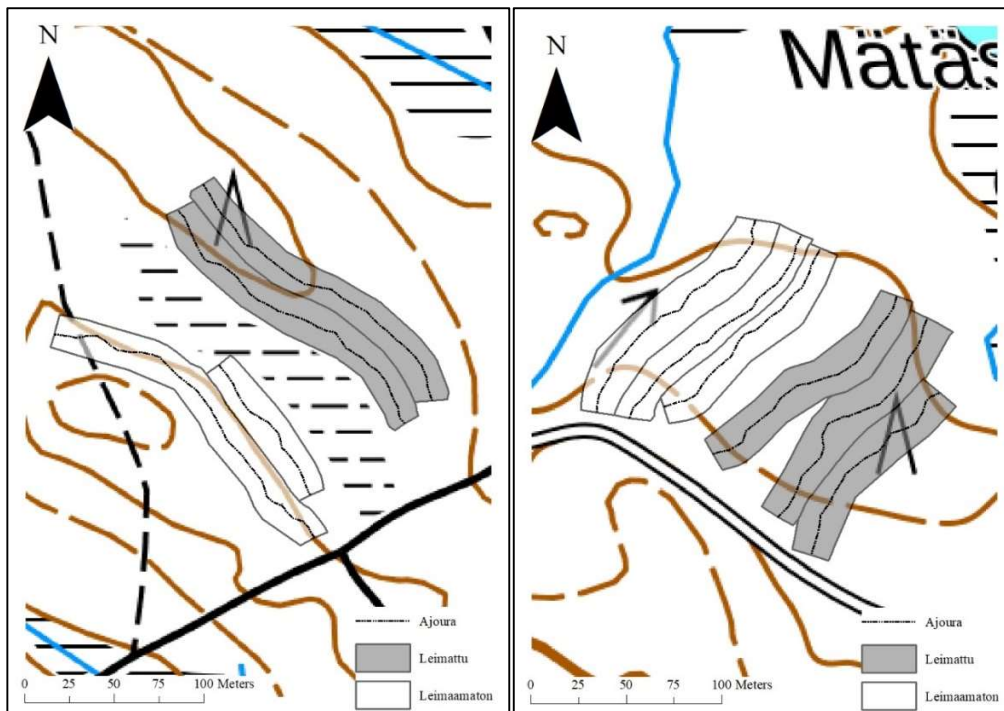
Leimikkokohtaiset koealat koostuivat kahdesta eri käsittelyvaihtoehdosta (leimattu, L / vertailu, V). Kuljettajakohtaisia hakkuukoealoja valmisteltiin vähintään kaksi kappaletta kumpaakin käsittelyvaihtoehtoa kohti jokaisella leimikolla. Leimikoiden koko ja rakenne vaikuttivat hakkuukoealojen kokoon ja niiden kokonaislukumäärän, joka oli 41 kpl. Hakkuukoealat pyrittiin perustamaan tasaisiin ja kulkukelpoisuudeltaan keskenään samankaltaisiin paikkoihin. Leimatut ja leimaamattomat hakkuukoealat sijoitettiin mahdollisuuksien mukaan yhtenäisiin kokonaisuuksiin (kuvat 11 ja 12). Leimatut hakkuukoealat sijoitettiin vierekkäin, jotta normaaliin tapaan tehtävissä hakkuukoealoissa ajourasuunnittelu voitiin tehdä mahdollisimman vapaasti. Ennakkoleimatut hakkuukoealat rajautuivat maastoon poistettavien puiden merkinnän perusteella. Leimaamattomilla hakkuukoeloilla koealan lähtöpiste määritettiin etukäteen.

Ennakkoleimatuilla hakkuukoealoilla poistettavat puut erotettiin puujoukosta käyttäen merkintämaalia. Merkitsemättä jääneet puut edustivat siten säästettäviä puita. Vierekkäiset hakkuukoealat erotettiin toisistaan siten, että joka toisessa hakkuukoealassa poistettavien puiden merkintäväri oli eri. Poistettavien puiden merkinnässä käytettiin hakkuukoealasta riippuen sinistä tai punaista merkintämaalia. Ensiharvennuskohteilla merkittiin myös ajouran paikka kelta-punaisella kuitunauhalla. Kaikki ajourilta poistettavat puut merkittiin.





**Kuva 11.** Hakkuukoealojen sijoitteluperiaate. Tilanteessa koealan pituus on 100 metriä. Ensimmäinen hakkuukoeala on leimattu punaisella ja toinen sinisellä merkintämaalilla. Vertailukoealalle piirretty ympyräkoealapari esittää jälkimittauskoealaa, jota käytettiin harvennusvoimakkuuden todentamiseen.



**Kuva 12.** Hakkuukoealojen sijoittelu käytännössä. Karttakuvat leimikoista C\_EH1 (vas.) ja B\_HH2 (oik.).

Ennakkoleimaustyötä tehdessä hakkuukoealan sivuraja ja ajouran keskilinja merkittiin merkintäkepeihin tai pystypuihin kiinnitetyillä kuitunauhoilla (kuva 13) 10 metrin välein. Kuitunauhojen muodostamia 10 m x 10 m kokoisia ns. leimausruutuja hyödynnettiin jäävän puuston määrän arvioinnissa. Toisella harvennuksella leimaustyön ohessa määritettiin puuston valtapituus ja keskiläpimitta, joita tarkennettiin, mikäli puuston ominaisuudet silmämääräisesti muuttuivat. Hakkuun jälkeinen tavoitepohjapinta-ala muutettiin runkoluvuksi käyttämällä Niemistön (1992) esittämiä muunnostaulukoita.

Leimauksen toteutukseen kehitetyn systemaattisen menetelmän vaiheet olivat seuraavat:

1. Merkitään ajoura: Kuljetaan koko ajouran matka hakkuukoealan alkupisteestä loppupisteeseen merkiten ajouran keskilinja kelta-punaisella kuitunauhalla.
2. Merkitään hakkuukoealan sivurajat (nosturin ulottuma): Valmistellun ajouran päässä mitataan ajouran keskikohdasta 10 m:n etäisyys kohtisuoraan poispäin ja merkitään hakkuukoealan sivuraja kuitunauhalla. Vastaava merkintä tehdään koko hakkuukoealan matkalta molemmille sivurajoille yksi kerrallaan.
3. Ensiharvennuksella leimataan ajouralta poistettavat puut: Merkitään ajouralta hakattavat puut punaisella/sinisellä merkintävärillä rinnankorkeudelle. Ajouran tavoiteleveys on 4,5 m.
4. Merkitään ajouran ulkopuolelta selkeästi poistettavat puut: Merkitään koealan sivurajaan ja ajouran keskikohtaan rajoittuvan 10 m x 10 m kokoisen leimausruudun sisällä puut, jotka ovat riskialttiita luonnolliseen kuolemaan tai niillä ei ole kasvupotentiaalia.
5. Toistetaan poistettavien puiden etsintää niin kauan, kuin harvennuksen jälkeinen tavoitetiheys leimausruudussa on saavutettu (1,0 a:n kokoisessa leimausruudussa jokainen säästettävä puu vastaa tiheyttä 100 r/ha). Merkitään poistettavat puut punaisella/sinisellä merkintämaalilla.
6. Siirrytään seuraavaan leimausruutuun.
7. Toistetaan vaiheita 4-6 niin kauan, kunnes hakkuukoealan päätepiste on saavutettu. Tämän jälkeen kuljetaan ajouran toinen puoli läpi vastaavasti kuin edellä on esitetty.
8. Mikäli kertymä koealalla on alle 150/80 r (EH/HH), pidennä koealaa mahdollisuuksien mukaan.



**Kuva 13.** Poistettavien puiden ja ajouran (kuitunauha) merkintä. Kuvat tutkimusleimikon C\_EH1 leimatulta koealaparilta.

Edellä esitetty teoreettinen leimausmenetelmä ei soveltunut kaikilta osin käytäntöön. Menetelmän haasteeksi osoittautui erityisesti toisella harvennuksella lähtöpuuston vaihteleva ja keskimäärin alhainen määrä suhteessa harvennuksen jälkeiseen tavoitetasoon. Jotta kertymää saatiin nostettua, puita leimattiin huolimatta siitä, että harvennuksen jälkeinen pohjapinta-ala jäi leimausruudussa alle tavoitetason. Leimatut puut olivat takakasvuisia, huonolaatuisia, tai niiden etäisyys säästettäviin puihin oli silmämääräisesti katsottuna liian pieni. Toisella harvennuksella paikoin yli 20 metrin ajouraväli kahden leimatun koealan välillä aiheutti sen, että poistettavia puita piti leimata yli 10 metrin päästä ajouran keskilinjasta.

### 5.3 Aikatutkimusaineiston kerääminen hakkuukoealoilta

Hakkuutyön aikatutkimusmateriaali hankittiin hakkuukoneen ohjaamoon kiinnitetyllä videokameralla. Seurantalaitteisto asennettiin hakkuukoneisiin siten, ettei se haitannut kuljettajan näkyvyyttä. Videomateriaalin lisäksi hakkuukoneiden tietokoneista kerättiin pohjoismaiseen StanForD-tiedonsiirtostandardiin (Skogforsk 2019) perustuvat runkojen dimensiotiedostot (pituus- ja läpimittatiedot, \*.stm tai \*.hpr). Hakkuutyön päätyttyä videotallennus lopetettiin ja hakkuukoneen mittalaitetiedot tallennettiin ulkoiselle kovalevyille.

Kuljettajilta edellytettiin raportointia niissä tilanteissa, joissa ennakkoleimauksesta poikettiin. Poikkeavat menettelyt jaettiin kahteen eri tilanteeseen:

- 1) Kuljettaja joutuu poistamaan säästettävän puun saadakseen myös leimatun puun hakattua.
- 2) Kuljettaja poistaa säästettävän puun kompensoidakseen sitä, että leimattu puu on liian vaikeassa paikassa.

Poikkeavat menettelyt tallennettiin hakkuutyöstä tehtävälle videotallenteelle. Riippuen ennakkoleimauksesta poikkeavaan puuvalintaan johtavasta syystä, kuljettajaa ohjeistettiin lausumaan työn ohella edellä esitettyjä vaihtoehtoja vastaavasti: 1) ”este” ja 2) ”korvaan”. Kuljettajaa ei ohjeistettu poikkeamaan ennakkoleimauksesta vähentääkseen syntyneitä korjuuvaurioita.

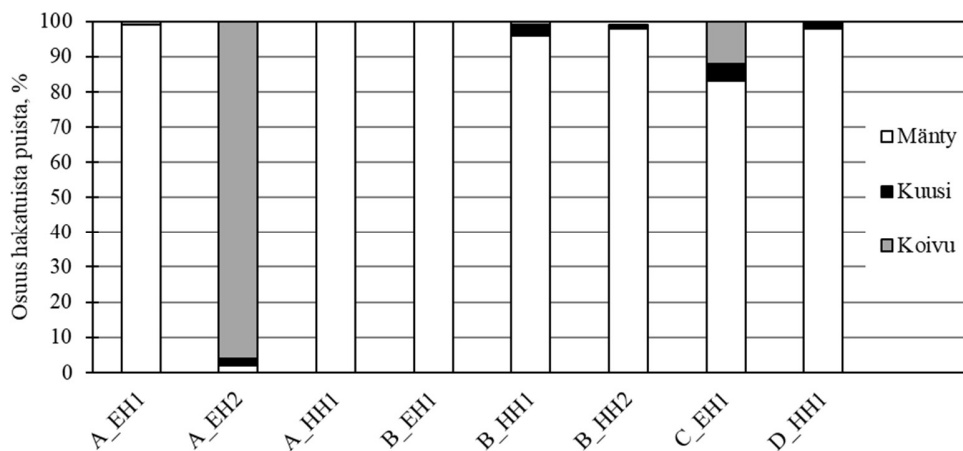
Hakkuutyöt suoritettiin päivänvalossa. Leimikoilla yhtä käsittelyvaihtoehtoa edustavat hakkuukoealat hakattiin peräkkäin ilman erillisiä lepotaukoja. Kuljettajat A ja B hakkasivat sekä ensiharvennuksia että toisia harvennuksia. Kuljettaja C hakkasi ainoastaan ensiharvennusleimikon ja kuljettaja D pelkästään toisen harvennuksen (taulukko 2). Kaikilta kuljettajilta ei saatu otosta molemmista hakkuutavoista tutkimukseen soveltuvien kohteiden rajallisen leimikkovarannon ja leimikoiden maantieteellisen jakautumisen takia.

Hakkuukoealoilta hakattiin yhteensä 4825 runkoa, ja hakkuutyön ajanmenekki oli yhteensä 28,7 h. Hakkuukoealan keskimääräinen koko oli ensiharvennuksella 169/161 (L/V) runkoa ja toisella harvennuksella 78/75 runkoa. Kummassakin käsittelyssä yhden hakkuukoealan hakkuuseen kului keskimäärin 42 minuuttia. Otokoko vaihteli tutkimusleimikoiden ja käsittelyvaihtoehtojen välillä (taulukko 2).

**Taulukko 2.** Aikatutkimuksessa käytetty aineisto leimikoittain. Työvaiheittaiset ajanmenekit ratkaistiin analysoimalla runkojen hakkuuseen kulunut aika. Poistumatietoa hyödynnettiin siirtymisajan mallinnuksessa.

Leimikko	Koealoja, kpl		Hakattuja runkoja, kpl/yhteensä		Poistuma, r/ha		Hakkuuaika, min	
	L	V	L	V	L	V	L	V
A_EH1	3	3	379	506	637	872	120	154
A_EH2	2	3	225	255	631	766	83	93
A_HH1	4	4	289	180	250	227	109	66
B_EH1	2	2	276	294	639	894	89	95
B_HH1	3	3	227	328	278	429	90	141
B_HH2	2	2	187	158	300	246	70	74
C_EH1	2	2	644	559	903	983	207	211
D_HH1	2	2	160	158	243	256	62	57

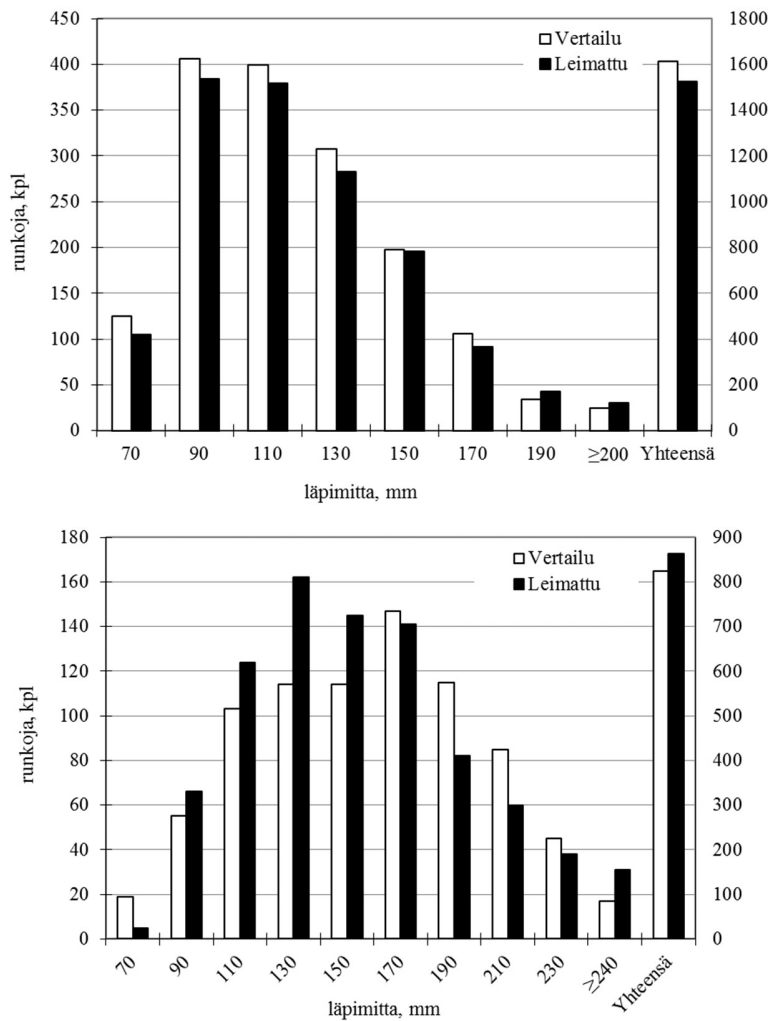
Hakkuukoealojen kokonaiskertymä oli 463 m<sup>3</sup>. Hakkuussa valmistetut puutavaralajit olivat ensiharvennuksella kuitupuu, ja kuljettajilla A ja D toisella harvennuksella sekä tukki- että kuitupuu. Leimikoiden poistumasta pääpuulajin osuus oli 83–100 % valmistetuista rungoista (kuva 14).



**Kuva 14.** Eri puulajien suhteellinen osuus poistumasta leimikoittain. Kuljettajan C ensiharvennuksella viisi haapaa on sisällytetty puulajiositteeseen koivu.

Ensiharvennuksella poistuman keskiläpimitan vaihteluväli oli leimatussa käsittelyssä 95–125 mm ja normaalissa hakkuussa 99–118 mm. Toisella harvennuksella keskiläpimitan vaihteluvälit olivat vastaavasti 134–185 mm ja 140–176 mm. Keskiläpimita määritettiin hakkuukoneen mittalaitetiedoista 10 cm:n kannonkorkeuden oletuksella. Hakkuussa poistetut puut jakautuivat läpimittaluokkiin kuvan 15 mukaisesti (koko aineistosta laaditut jakaumat eivät

kuvaa puuvalintaa järeysluokittain, sillä jakaumien muotoon vaikuttavat puustoltaan erilaiset leimikot, joiden otoskoko on vaihdellut keskenään ja käsittelyvaihtoehdoittain). Poistuman tarkemmat kuvailutiedot ( $d_{1.3}$ ,  $v$ ,  $r/ha$ ,  $m^3/ha$ ) leimikoittain, käsittelyvaihtoehdoittain ja puulajeittain on esitetty liitteessä 2.



**Kuva 15.** Poistuman läpimittajakaumat (vas. pysty akseli) ja valmistettujen runkojen kokonaismäärät (oik. pysty akseli) käsittelyvaihtoehdoittain. Ylhäällä on ensiharvennuksen kuvaaja ja alhaalla on toisen harvennuksen kuvaaja.

#### 5.4 Korjuujälkimittausten tekeminen hakkuun jälkeen

Hakkuutyön jälkeen hakkuukoealoilla tehtiin hakkuussa jätettyjen vikaisten puiden inventointi ja harvennusvoimakkuuden todentaminen. Korjuujälkimittauksessa jokaiselta koealalta mitattiin metsikön valtapituus, keskiläpimitta ja runkoluku. Metsikön iän määrittäminen tehtiin hakkuun jälkeen poistettujen puiden kaatoleikkauspinnoista.

Jäävän puuston määrä mitattiin 1,0 aarin kokoisilta ympyräkoealoilta (kuva 10). Mittauspisteessä ympyräkoeala otettiin kummaltakin puolelta ajouraa, ja jäävän puuston runkoluku oli mittaustulosten keskiarvo. Ympyräkoealat sijoitettiin 2,8 m etäisyydelle ajouran reunasta. Ajouran reunaksi tulkittiin aina se kohta, joka oli ajouran keskikohdasta katsottuna lähimmän puun sijainti. Ajouran osuus mittaustuloksesta oli n. 20 %, mikä vastaa 4 metrin ajouraleveyttä. Keskiläpimitta laskettiin läpimitaltaan ympyräkoealaparin toiseksi pienimmän ja toiseksi suurimman puun keskiarvona. Toiseksi suurimman ja pienimmän puun perusteella määritetty keskiläpimitta on tarkin läpimittaestimaatti, kun metsikön kaikkia puita ei lueta (Niemi 1992). Valtapituus oli ympyräkoealoille kuuluneista puista paksuimman puun pituus. Mittauspisteitä perustettiin 20 metrin välein ajouran suuntaisesti. Ensimmäinen jälkimittauskoeala perustettiin puolen otantavälin (10 m) päähän hakkuukoealan aloituskohdasta.

Ensiharvennuksella jokaisessa mittauspisteessä mitattiin ajouran leveys. Ajouran leveyden määrittivät 5 metrin matkalta mittauspisteestä eteen- ja taaksepäin katsottuna ajouran keskilinjaa lähimpänä olevat puut. Ajouran leveys oli näiden lähimpänä uran keskilinjaa sijaitsevien puiden välinen ajouraa kohtisuoraan vastaan oleva etäisyys. Korjuussa jätettyjen vikaisten puiden inventointi tehtiin hakkuun jälkeen kaikille hakkuukoealoille totaali-inventointina. Selkeinä vikoina tutkimuksessa huomioitiin haaroittuminen, pystyoksa, mutka, vakava lenkous (yli 3 cm/metri), korot ja latvakatko.

## 5.5 Aineiston laskenta

### 5.5.1 Työvaiheluokitus

Työn tutkimusmenetelmä perustui työnvaiheittaiseen kelloaikatutkimukseen. Tutkimuksessa mukailtiin Kärhän ym. (2004) ja Nurmisen ym. (2006) käyttämiä työvaiheluokitteluja. Seuraavassa on esitetty aikatutkimuksessa käytetyt hakkuun tehoajanmenekin työvaiheet ja niiden kuvailu:

- *Siirtyminen*: Alkaa hakkuukoneen liikkeellelähdestä ja loppuu hakkuukoneen pysähtymiseen tai hakkuulaitteen vientiin. Siirtyminen voi olla eteenpäin ajoa tai peruutusta. Siirtyminen voi tapahtua työpisteen sisällä tai työpisteiden välillä.
- *Hakkuulaitteen vienti*: Alkaa hakkuupään liikkeestä kohti poistettavaa puuta ja loppuu kaatosahauksen alkamishetkeen.
- *Kaato ja tuonti*: Alkaa puun kaatosahauksesta ja loppuu hakkuulaitteen syöttörullien liikkeen alkamishetkeen, kun rungon yhtäjaksoinen prosessointi aloitetaan. Työvaiheeseen sisältyy rungon osittainen syöttö, jos runko ei ole vielä kasalla, tai hakkuulaite ei ole vaaka-asennossa.
- *Prosessointi*: Sisältää karsinnan, katkonnan ja puutavaralajien käsittelyn toiminnot. Alkaa syöttörullien liikkeestä ja loppuu, kun karsintaterät avautuvat ja puun latvaosa lähtee tippumaan maahan. Työvaiheeseen sisältyy puutavaralajien erillään pito ja valmistaminen omille kasoille.
- *Puomin tuonti eteen*: Huomioidaan tilanteissa, joissa puomia liikutetaan kohti nosturin tyveä ennen siirtymistä, tai vaihdettaessa työsektoria samalla peruuttaen.
- *Häiriöt ja järjestelyt*: Tyypillinen häiriö on esimerkiksi puun latvaosan kiinni jääminen hakkuulaitteeseen. Häiriö voi olla myös tekninen häiriö, joka ei vaadi hakkuukoneen käytön keskeyttämistä ja korjausta. Järjestely on hakkuutähteiden, rungon osien tai puutavarapölkkyjen mahdollista siirtelyä ja kasausta muuten kuin prosessoinnin yhteydessä.



### ***5.5.2 Aikatutkimusaineiston käsittely***

Kelloaikatutkimus tehtiin tunnistamalla videolta käynnissä oleva työvaihe ja määrittämällä kyseisen työvaiheen alkamis- ja päättymishetki. Työvaiheittaiset tehoajanmenekit määritettiin tarkoitusta varten luodulla MS Excel -taulukkolaskentaohjelmassa toimivalla sovelluksella. Sovellus tallensi työvaiheen ajanmenekin sekunteina alle 0,1 yksikön tarkkuudella. Jokaiselle rungolle merkittiin lisätietona pölkymäärä, jota hyödynnettiin myöhemmin aikatutkimusmateriaalin ja runkotietojen yhdistämisessä. Normaalista poikkeaville hakkuusykleille kohdistettiin kellotuksessa lisätieto. Normaalista poikkeavat työsyklit syntyivät esimerkiksi kaatuneen puun (38 kpl), latvakatkon (75 kpl), kaksihaaraiset puun (103 kpl), samasta kylvötuppaasta kasvaneiden useampien runkojen (14 kpl), tai pystytuusta valmistettavan teko-pötkkelön (2 kpl) hakkuusta. Normaalista poikkeavat työsyklit huomioitiin työvaiheiden ajanmenekkien laskennassa ja mallinnuksessa. Esimerkiksi latvakatkoja tai kaksihaaraisia puita ei huomioitu prosessoinnin sekä kaadon ja tuonnin mallinnuksessa. Normaalista poikkeavien puiden hakkuuseen liittyvä järjestelyaika (esim. lumituhopuun latvaosan poimiminen maasta) sisältyi työvaiheeseen häiriöt ja järjestelyt. Työvaihetta ei otettu laskentaan mukaan, jos siihen vaikutti työsyklissä esiintyvä häiriö.

Runkokohtaiset ajanmenekit yhdistettiin hakkuukonedataan, jotta hakkuun ajanmenekkiä voitiin tarkastella suhteessa rungon tilavuuteen. Hakkuukone- ja kellotustiedot yhdistettiin MS Excel -taulukkolaskentaohjelmassa. Tutkimusaineisto luokiteltiin käytettyjen kuljettajien, hakkuutapojen ja käsittelyvaihtoehtojen kesken leimikoittain. Jokaiselle rungolle kohdistettiin sama ajanmenekki työvaiheista, jotka eivät esiinny jokaisella rungolla. Puomin eteen tuonnin, siirtymisen sekä häiriöiden ja järjestelyjen runkokohtaiset ajanmenekit saatiin jakamalla kyseisten työvaiheiden kokonaisajamenekit hakattujen runkojen kokonaismäärällä.

Aikatutkimusvideolta kerättiin talteen kuljettajien raportoimat poikkeukselliset puuvalinnat.

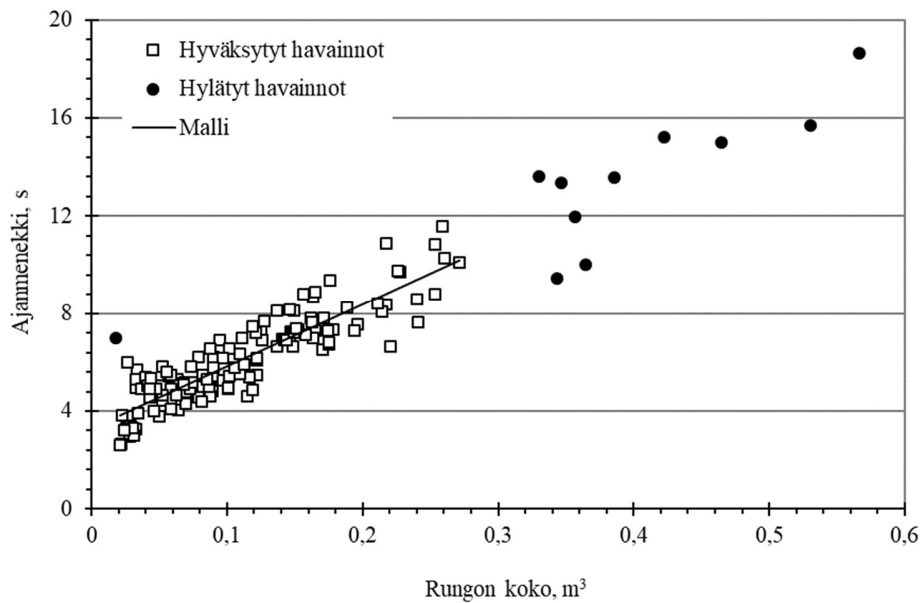
### ***5.5.3 Työvaiheiden ajanmenekkilaskenta***

Aikatutkimuksen tuloksena saatiin selville leimikkokohtaisesti hakkuun työvaiheiden keskimääräiset ajanmenekit eri käsittelyvaihtoehdoissa. Leimikkokohtaisten tulosten perusteella

laskettiin työvaiheiden suhteelliset osuudet tehoajanmenekistä hakkuutavoittain ja käsittelyvaihtoehtoitain. Yhteenvetotiedon avulla tutkittiin, vaikuttaako ennakkoleimaus hakkuutyön tehoajanmenekkirakenteeseen. Tutkimusongelman kannalta oleelliset työvaiheet olivat hakkuulaitteen vienti ja siirtyminen. Näiden työvaiheiden välisiä ajanmenekkieroja kuljettajien ja käsittelyvaihtoehtojen välillä tutkittiin suhteellisina arvoina.

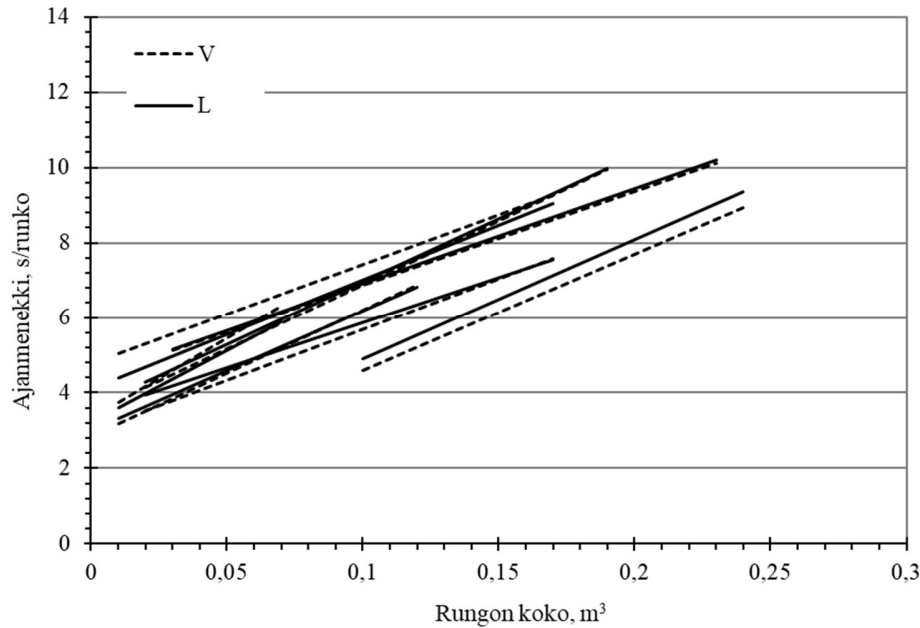
Taulukkomuotoista aineistoa käsiteltiin tilasto-ohjelmalla SPSS. Tilastollisia tutkimusmenetelmiä olivat regressioanalyysi ja riippumattomien otosten vertailuun soveltuvat testit. Regressioanalyysissä käytettiin Regression ja GLM (General Linear Model) -toimintoja. Tilastollinen testi valittiin vertailtavien ryhmien määrän ja havaintojen normaalijakautuneisuuden perusteella. Normaalijakautuneisuutta tutkittiin Shapiro-Wilk testillä. Tutkimuksessa käytettiin ei-parametrisia menetelmiä, koska työvaiheiden ajanmenekkihavainnot eivät olleet normaalisti jakautuneita. Merkitseviä eroja työvaiheiden runkokohtaisten ajanmenekkien (s/runko) tai keskimääräisten ajanmenekkien (s) välillä eri käsittelyvaihtoehtoisissa tutkittiin kahden riippumattoman otoksen Mann-Whitneyn U-testillä. Tilastollisten testien nollahypoteesi oli se, että ajanmenekit poikkeavat toisistaan eri käsittelyvaihtoehtojen kesken. Nollahypoteesi hylättiin, jos p-arvo oli suurempi kuin 0,05 (tarkoittaa sitä, että yli 5 % todennäköisyydellä nollahypoteesi ei pidä paikkaansa ja erot ajanmenekissä johtuvat ainoastaan satunnaisvaihtelusta).

Työvaiheista puun prosessointi, kaato ja tuonti sekä hakkuulaitteen vienti esiintyvät jokaisella rungolla. Työvaiheiden ajanmenekin ja puun tilavuuden välistä riippuvuussuhdetta tutkittiin korrelaatiokertoimien avulla. Riippuvuussuhde huomioitiin leimikkokohtaisten tulosten laskennassa, jos työvaiheen ajanmenekin ja puun tilavuuden välillä havaittiin merkitsevä ja samansuuntainen korrelaatio kaikissa saman kuljettajan tekemissä hakkuissa. Mikäli työvaihe korreloi puun tilavuuden kanssa, ajanmenekin mallinnus tehtiin leimikoittain ja käsittelyvaihtoehtoitain (kuva 16). Muuttujan tulkittiin selittävän työvaiheen ajanmenekkiiä merkitsevästi, jos lineaarisessa mallissa muuttujaan liitetyn parametrin havaittu testisuureen p-arvo oli  $< 0,05$ . Mallien valintaan vaikuttivat jäännösvirheiden normaalijakautuneisuus ja selitysaste ( $R^2$ ). Ilmiötä keskimäärin parhaiten selittävää mallia käytettiin jokaisella tutkimusleimikolla.



**Kuva 16.** Havainnekuva prosessoinnin mallintamisesta yksittäisen tutkimusleimikon leimatussa käsittelyssä.

Työvaiheiden mallinnus tehtiin yhdellä leimikolla molemmissa käsittelyissä aina samalle vaihteluvälille. Mallinnuksen alarajan määritti samalla leimikolla käsittelyvaihtoehdoista se, jossa 5. prosenttipiste oli lukuarvoltaan suurempi ja ylärajan vastaavasti 95. prosenttipisteestä lukuarvoltaan pienempi. Mallinnettavan työvaiheen ja puun tilavuuden välillä todettiin olevan samankaltainen riippuvuussuhde, jos mallien kulmakertoimien 5–95 % luottamusvälit olivat päällekkäiset samalla leimikolla (kuva 17). Tällöin ennakkoleimauksen vaikutusta tutkittiin valemuuttujamalleilla. Valemuuttujamalleissa eri käsittelyvaihtoehdot noudattavat samaa perusyhtälöä, ja ajanmenekkierot ovat valemuuttujan kertoimiin perustuvia keskimääräisiä tasoeroja. Tutkimuksessa laadituissa valemuuttujamalleissa jonkin muuttujan arvo valittiin perustasoksi (kyseiseen valemuuttujaan liittyvän parametrin kerroin = 0), johon muut arvot suhteutettiin.



**Kuva 17.** Havainnekuva mallien kulmakertoimien vertailusta samalla tutkimusleimikolla käsittelyvaihtoehdoittain. Samalle vaihteluvälille piirretyt suorat edustavat yksittäistä tutkimusleimikkoa. Kuva ei pidä tulkita työn tuloksena.

Keskimääräisen siirtymisajan (s) eroa käsittelyjen välillä tutkittiin Mann Whitney U-testillä. Lisäksi siirtymisajat luokiteltiin siirtymisajan keston perusteella. Luokittelun avulla pyrittiin tunnistamaan, onko työpisteiden välisten ja työpisteiden sisällä tapahtuvien siirtymien välillä systemaattisia eroja. Runkokohtainen siirtymisaika riippuu poistuman tiheydestä (Lageson 1997). Ennakkoleimauksen vaikutusta runkokohtaiseen siirtymisaikaan (s/r) arvioitiin vertaamalla tutkimuksessa havaittuja ajanmenekkieroja teoreettiseen ajanmenekkieroon normaalissa hakkuussa, kun poistumat ovat erisuuret kahden tilanteen välillä. Runkokohtaisten siirtymisaikojen muutosta tutkittiin Kuiton ym. (1994) siirtymisajan mallilla. Malli on muotoa:

$$z = -0,07255 \cdot [\ln(0,000414 \cdot y - 0,03039)] \quad (1)$$

, jossa  $z$  = siirtymisaika, min/runko ja  $y$  = poistuman tiheys, runkoa/ha. Siirtymisaika mallinnettiin suhteessa poistuman tiheyteen myös tässä tutkimuksessa. Mallinnuksessa yhdeltä koealalta laskettu poistuman arvo ja keskimääräinen siirtymisaika muodostivat yhden havainnon. Mallinnuksessa poistettiin yksi poikkeuksellinen havainto, jolloin myös otoskoko oli molemmissa käsittelyissä yhtä suuri kuljettajittain.

Häiriöiden ja järjestelyjen ajanmenekki laskettiin koko aineistosta keskimääräisenä arvona hakkuutavoittain, koska työvaiheen katsottiin olevan riippumaton käsittelyvaihtoehdosta. Työvaiheen ajanmenekistä n. 60 % koostui normaalista poikkeavien puiden hakkuuseen kuuluvasta järjestelytyöstä. Normaalista poikkeavien puiden lukumäärä riippuu puolestaan lähöpuuston ominaisuuksista. Normaaleiden puiden hakkuussa työvaiheen runkokohtainen ajanmenekki oli pieni, keskimäärin alle 1 % tehoajanmenekistä. Työvaiheen ajanmenekki vakioitiin myös sen takia, että tekniset häiriöt ovat sattumanvaraisia, eivätkä ne kuvaa ennakkoleimauksen vaikutusta hakkuutyöhön. Häiriöt ja järjestelyt otettiin laskentaan mukaan sen takia, että työvaihe on määritelmällisesti osa tehoajanmenekkiä.

#### ***5.5.4 Hakkuutyön tehoajanmenekin ja tuottavuuden laskenta***

Tehoajanmenekkimalleilla määritettiin hakkuutyön ajanmenekki tietyllä rungon koolla. Leimikkokohtaisissa malleissa laskentaan tuli mukaan valemuuttujamallin antama lukuarvo tai keskiarvoluku riippuen työvaiheesta ja kuljettajasta. Tehoajanmenekkimallit muodostettiin yksittäisten työvaiheiden ajanmenekkien summana:

$$t_{kok} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 \quad (2)$$

jossa

$t_{kok}$  = Hakkuun tehoajanmenekki, s/runko

$t_1$  = Hakkuulaitteen viennin ajanmenekki, s/runko

$t_2$  = Kaadon ja tuonnin ajanmenekki, s/runko

$t_3$  = Prosessoinnin ajanmenekki, s/runko

$t_4$  = Puomin eteen tuonnin ajanmenekki, s/runko

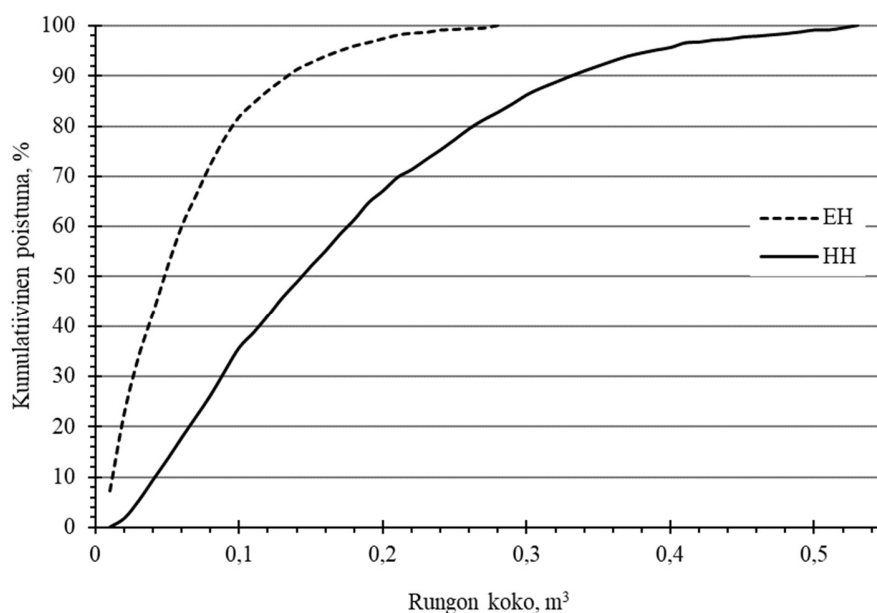
$t_5$  = Siirtymien ajanmenekki, s/runko

$t_6$  = Häiriöiden ja järjestelyn ajanmenekki, s/runko

Kuljettajakohtaista ja kuljettajien välistä vaihtelua hävitettiin ja sovitettiin samaan tasoon muodostamalla tehoajanmenekkimallit hakkuutavoittain ja käsittelyvaihtoehdoittain. Kuljettajille yhteisissä tehoajanmenekkimalleissa harvennusvoimakkuus eri käsittelyissä vakioitiin. Vastaavasti prosessoinnin sekä kaadon ja tuonnin ajanmenekit vakioitiin eri käsittelyissä samalla rungon järeydellä. Tämä perustui työn lähtöoletukseen siitä, että ennakkoleimaus ei vaikuta puun prosessointiin tai kaatoon ja tuontiin. Yhteismallien laskennassa kuljettajaa

käytettiin valemuuttujana, jotta kuljettajien vaihteleva otoskoko voitiin huomioida. Yhteinen prosessoinnin tai kaadon ja tuonnin malli saatiin, kun valemuuttujamallin perusyhtälöön li-  
sättiin valemuuttujiin liitettyjen kertoimien keskiarvo. Tällöin jokainen kuljettaja vaikutti  
saadun mallin kulmakertoimeen ja vakiotermiin yhtä suurella painoarvolla. Tehoajanmenek-  
kimallit (L/V) hakutavoittain laskettiin prosessoinnin sekä kaadon ja tuonnin yhteismallien,  
siirtymisaikamallien, ja muiden työvaiheiden keskiarvojen perusteella.

Hakkuutyön tehoajanmenekki muutettiin tehotuntituottavuudeksi. Tuottavuus eri käsitte-  
lyissä laskettiin leimikkokohtaisesti. Laskennoissa käytettiin harmonisoituja järeysjakaumia,  
joiden avulla poistettavien puiden määrä ( $m^3$  ja kpl) vakioitiin eri käsittelyissä. Tuottavuus  
laskettiin harmonisoitua järeysjakaumaa noudattavan puujoukon hakkuuseen kuluvan ajan  
perusteella. Tuottavuusluvut laskettiin myös kuljettajille yhteisillä ajanmenekkimalleilla ja  
keskimääräisillä järeysjakaumilla hakkuutavoittain (kuva 18). Tehoajanmenekkierojen tar-  
kasteluissa normaali hakkuu oli perustaso, johon ennakkoleimatun hakkutyön ajanmenekkiä  
verrattiin.



**Kuva 18.** Kuljettajien keskimääräisten tuottavuuslukujen laskennassa käytetyt poistuman järeysjakaumat eri hakkuutavoissa.

Tuottavuusluvut ( $r/h$ ,  $m^3/h$ ,  $ha/h$ ) esitettiin käyttötuntituottavuutena, koska se kuvaa tuotta-  
vuutta paremmin kuin tehotuntituottavuus (Kärhä ym. 2004). Tarvittava ajanmenekkilisäys  
( $s/runko$ ) saatiin siten, että kirjallisuuteen perustuva alikasvoksen raivauksen ja alle 15 min

keskeytysten suhteellinen osuus kerrottiin normaalin hakkuun keskimääräisellä tehoajanmenekillä. Perustuen Rajamäen ym. (1994) esittämään harvennushakkuutyön ajanmenekkikenteeseen, tehoajanmenekin osuus käyttöajanmenekistä oli 80 % ensiharvennuksella (alikasvoksen raivaus 7 % ja alle 15 min:n keskeytykset 13 %) ja 86 % toisella harvennuksella (alikasvoksen raivaus 3 % ja alle 15 min:n keskeytykset 11 %). Alle 15 min keskeytyksien ja alikasvoksen raivauksen runkokohtaista ajanmenekkiä pidettiin kuljettajasta riippumattomana. Tämä tarkoittaa sitä, että kuljettajan tuottavuus (r/h) ja esimerkiksi teräketjun vaihtotarve (krt/h) kasvavat samassa suhteessa, ja toimenpiteiden tekemiseen kuluu kaikilta kuljettajilta yhtä pitkä aika. Tutkimusolosuhdeperäisistä syistä (kohteiden ennakkoraivaus, aineiston koko) johtuen aikatutkimuksessa ei voitu määrittää edellä mainittujen ajanmenekkien keskimääräistä osuutta harvennushakkuussa.

#### **5.5.5 Korjuutyön laatu**

Korjuutyön laatua arvioitiin käsittelyvaihtoehdoittain jälkimittauskoealoilta laskettujen keskitunnusten ja vikaisten puiden inventointitietojen perusteella. Harvennusvoimakkuutta arvioitiin vertaamalla kasvatettavan puuston runkolukua/pohjapinta-alaa metsänhoidon suositusten (Äijälä ym. 2014) mukaiseen tavoitetasoon. Leimikko tulkittiin sekametsäksi, jos jäävän puuston lehtipuuprosentti oli yli 15. Sekametsän tavoitetiheys oli männyn harvennusmallin alaraja. Vastaavasti kuin puulajipuhtaan männikön ensiharvennuksessa, suositusten ylä- ja alarajaksi asetettiin tavoitetiheys  $\pm 100$  r/ha. Harvennusvoimakkuus laskettiin jäävän puuston määrän lisäksi suhteellisena eli poistuman osuutena lähtöpuustosta. Hakkuussa säästyneitä vikaisia puita eri käsittelyvaihtoehdoissa tarkasteltiin leimikoittain. Puuvalintaa järeysluokittain tutkittiin vertaamalla poistuman läpimittajakaumia Kolmogorov-Smirnovin -testillä. Poistuman läpimittajakaumien todettiin poikkeavan eri käsittelyissä merkitsevästi toisistaan, jos testin havaittu Z-testisuureen havaittu p-arvo oli  $< 0,05$ . Koealojen ajouraväli laskettiin paikkatieto-ohjelmassa perustuen Riekin & Melkkaan (2018) menetelmällä luotuihin digitaalisiin ajouriin. Ajouravälien tunnusluvut määritettiin käyttäen 5 metrin otantaväliä.

## 5.6 Kuljettajien haastattelu

Tutkimukseen osallistuneet kuljettajat haastateltiin tutkimushakkuiden jälkeen. Haastattelujen perusteella selvitettiin ennakkoileimauksen soveltuvuutta tutkimuksen menetelmänä. Kuljettajien kokemukset ennakkoileimauksesta kerättiin hakkuutavoittain. Koejärjestelyjä koskevien kysymysten lisäksi tutkimuksessa kartoitettiin kuljettajien kokema tarve puuvalinnan opastukseen. Tarkoitus oli selvittää kuljettajien suhtautuminen opastaviin järjestelmiin ja tunnistaa ne tekijät, joita koskevasta lisäinformaatiosta kuljettajat kokisivat hyötyvänsä poistettavien puiden valinnassa. Käytetty haastattelulomake on esitetty liitteessä 3.

## 5.7 Ennakkoileimauksen taloudellisen kannattavuuden laskeminen

Ennakkoileimauksen kustannussäästö laskenta perustui ennakkoileimatun harvennuksen ja normaalin harvennuksen käyttöajanmenekkieron (%) mahdollistamaan hakkuutyön muuttuvien kustannusten (esimerkiksi polttoaine- ja palkkakustannukset, €/h) laskuun. Ennakkoileimauksen kustannussäästö laskettiin osuutena hakkuukoneen muuttuvista käyttökustannuksista. Ennakkoileimaus ei laske hakkuutyön kiinteitä kuluja (€/h), koska ennakkoileimauksen käyttö ei vaikuta hakkuukoneen käyttöasteeseen (h/v). Työssä on arvioitu, että muuttuvat ja kiinteät kulut ovat yhteensä 75 €/h, josta muuttuvien kustannusten osuus on kaksi kolmasosaa eli 50 €/h. Jos hakkuukoneyrittäjän tuottovaatimus on 20 %, hakkuukonetyön kokonaiskustannukseksi muodostuu 90 €/h. Tämä vastasi likimäärin (+/- 5 €/h) tutkimuksen teon aikana havaittua kustannustasoa.

Järjestelmän mahdollistama kustannussäästö ennen menoja laskettiin hakkuukoneen vuotuisen käytön perusteella. Oletus hakkuukoneen keskimääräisestä käytöstä oli Mäkelän (2017) tutkimuksessa vastanneiden yrittäjien arvioiden keskiarvo, 2900 h/v (sekä yhden että kahden vuoron hakkuukoneilta). Samojen yrittäjien mukaan hakkuukoneet myydään eteenpäin yleensä noin 10 000 käyttötunnin jälkeen. Tämä tarkoittaa sitä, että puuvalintaa opastavan järjestelmän tulisi olla kannattava sijoitus neljän vuoden aikana ennen kuin kone myydään pois. Hakkuukoneen käyttötunnit jakautuvat valtakunnallisesti keskimäärin puoliksi päätehakuiden ja harvennusten kesken. Tämä perustuu seuraaviin tietoihin: 1) Päätehakkuutyö



on 1,5-kertaa tuottavampaa kuin harvennushakkuutyö (Kuitto ym. 1994) 2) Suomessa pääte-hakkuiden osuus oli vuonna 2017 noin 60 % kotimaisen puunkorjuun puumäärästä (Strand-ström 2018). Laskelmassa huomioitiin, että käytännössä hakkuutavat eivät jakaudu samassa suhteessa kaikilla hakkuukoneilla. Työssä tehtiin herkkyysanalyysi investoinnin kannatta-vuudesta, kun harvennusten osuus yksittäisen hakkuukoneen käyttötunneista on 50 %, 75 % ja 100 %.

Puuvalintaa opastavan järjestelmän nettonykyarvo (€) laskettiin neljän vuoden pitoajan pe-rusteella. Tulot olivat järjestelmän kustannussäästö (€/v) ja menojen oletusarvo oli 400 €/v. Investoinnin kannattavuudesta tehtiin herkkyysanalyysi eri hankintahinnoilla, vuosimenoilla ja laskentakoroilla. Jäännösarvo herkkyysanalyysissä oli 10 % järjestelmän hankintahinnasta. Järjestelmän nettonykyarvo saatiin diskonttaamalla järjestelmän menot (hankintameno ja vuosimenot) ja tulot (kustannussäästö ja jäännösarvo) nykyhetkeen. Laskennassa käytetty diskonttauserroin määräytyy seuraavasti:

$$d = \frac{1}{(1+i)^n} \quad (3)$$

, jossa  $d$  = diskonttauserroin,  $i$  = laskentakorko (%),  $n$  = ajanhetki investoinnin tekohetkestä (v). Investointi ei muuta yrityksen käyttöpääomaa (investoinnin tekeminen ei vaikuta liike-toiminnan normaaliin kassavirtaan), joten käyttöpääoman muutosta ei ollut mukana inves-tointilaskelmissa.

Investoinnin kannattavuuskehitystä selvitettiin skenaariolaskelman avulla. Skenaariolaskel-malla pyrittiin konkretisoimaan puuvalintaa opastavan järjestelmän kannattavuutta, kun han-kintahintakehitys perustuu hypoteettisiin lähtöoletuksiin. Investointilaskelma tehtiin tilan-teissa, joissa järjestelmä otetaan käyttöön joko heti tai kahden, neljän tai kuuden vuoden ku-luttua teknologian saapumisesta markkinoille (taulukko 3).

**Taulukko 3.** Investointilaskelman neljä eri investointijaksoa.

Laitteiston hankintameno, €	Aika teknologian markkinoilletulosta, v	Investointijakso			
		1	2	3	4
-40 000	0	0			
	1	1			
-21 000	2	2	0		
	3	3	1		
-11 250	4	4	2	0	
	5		3	1	
-6 188	6		4	2	0
	7			3	1
	8			4	2
	9				3
	10				4

Laskelma järjestelmän nettokustannusvaikutuksesta (€/v) perustui seuraaviin oletuksiin:

- 1) Järjestelmän hankintahinta markkinoille saapuessa on 40 000 €. Sensorien osuus kokonaishinnasta on 4000 €. Muut järjestelmänosat ja valmistuskustannukset ovat yhteensä 36 000 €.
- 2) Järjestelmän hankintahinta laskee ajan kuluessa. Sensorien hankintahinta laskee kahdessa vuodessa 25 % ja muiden järjestelmänosien hinta sekä valmistuskustannukset 50 %.
- 3) Tulot ovat järjestelmän kustannussäästö (€/v), kun hakkuukoneen työtunneista 75 % on harvennuksia ja muuttuvat käyttökustannukset ovat 50 €/h.
- 4) Menot eli koulutus- ja järjestelmän ylläpitokustannukset ovat alussa 400 €/v ja ne laskevat 10 % seuraavalle investointijaksolle siirryttäessä.
- 5) Sensorit uusitaan neljän vuoden käytön jälkeen (sensorien jäännösarvo on 0 €). Muiden järjestelmänosien jäännösarvo on 25 % uuden järjestelmän laskennallisesta hankintahinnasta investointijakson lopussa.
- 6) Tuottovaatimus määräytyy seuraavasti: a) Oman pääoman osuus on 40 % b) Oman pääoman tuottovaatimus on 20 % c) Velan osuus on 60 % d) Velan kustannus on 5 %. Tällöin laskentakorko on:  $0,4 \cdot 0,2 + 0,6 \cdot 0,05 = 0,11$  (11 %).
- 7) Järjestelmä on mahdollista ottaa käyttöön viidessä sadassa (500) hakkuukoneessa teknologian saapuessa markkinoille.

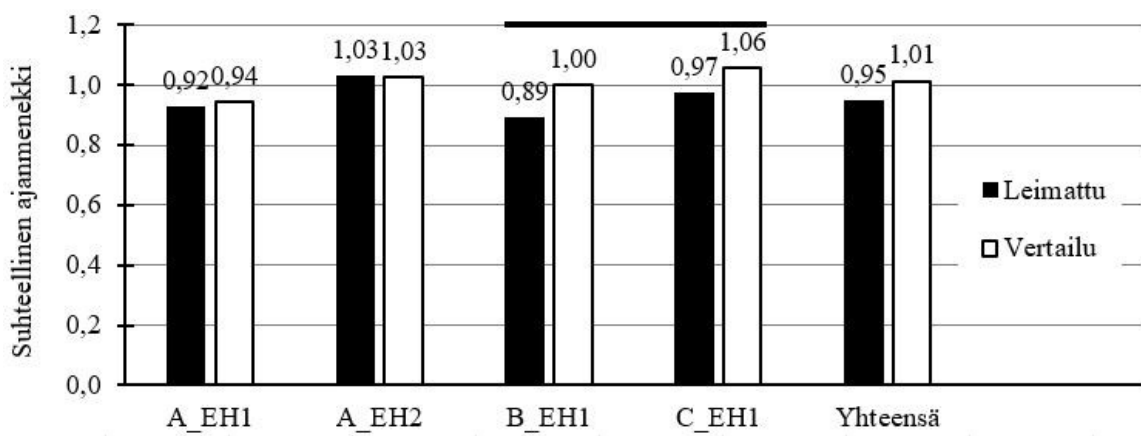
## 6 TULOKSET

### 6.1 Aikatutkimus

#### 6.1.1 Hakkuulaitteen vienti

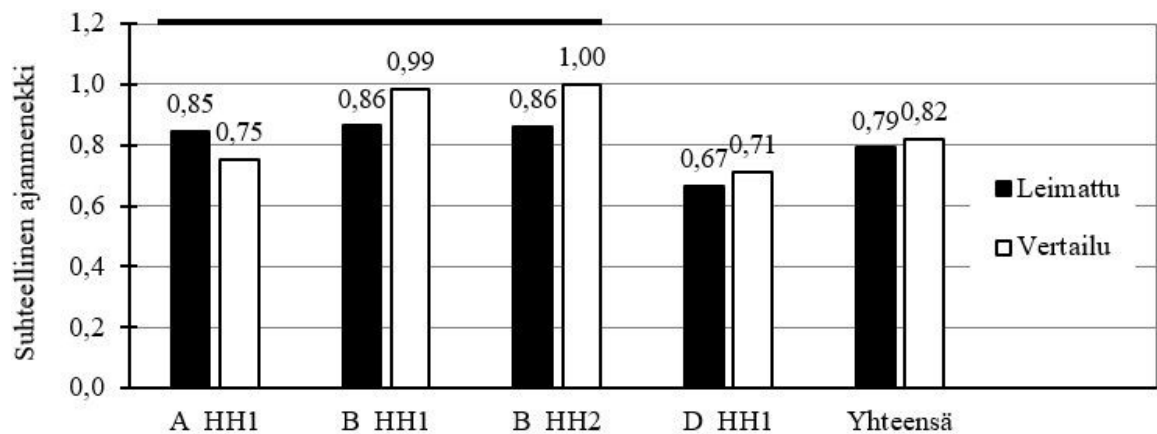
Hakkuulaitteen vienti oli ennakkoleimatussa harvennuksessa keskimäärin 7 % nopeampaa ensiharvennuksella ja 4 % nopeampaa toisella harvennuksella. Työvaiheen ajanmenekki (s/runko) poikkesi ennakkoleimatun ja normaalin harvennuksen välillä merkitsevästi viidellä eri tutkimusleimikolla. Mann Whitney U-testin tulokset ( $n$ ,  $U$ ,  $p$ ) on esitetty liitteessä 4.

Hakkuulaitteen vienti ensiharvennuksella oli joko yhtä nopeaa tai hieman nopeampaa leima-  
tuilla koealoilla kuin vertailukoealoilla (kuva 19). Kuljettajilla B ja C ennakkoleimaus no-  
peutti hakkuulaitteen vientiä. Ero oli tilastollisesti merkitsevä. Kuljettajalla A hakkuulaitteen  
viennin ajanmenekki ei riippunut käsittelyvaihtoehdosta. Männikössä (A\_EH1) ero käsitte-  
lyjen välillä oli keskimäärin 0,2 s, eikä ero ollut tilastollisesti merkitsevä. Koivikon (A\_EH2)  
harvennuksessa hakkuulaitteen vienti oli keskimäärin yhtä nopeaa molemmissa käsittelyissä.



**Kuva 19.** Hakkuulaitteen viennin ajanmenekit ensiharvennuksella. Kuljettajan B hakkuulaitteen viennin ajanmenekki normaalissa hakkuutyössä on vertailutaso, johon muut ajanmenekit on suhteutettu. Pylväiden yläpuolella oleva musta vaakaviiva osoittaa ne leimikot, joissa ennakkoleimaus on vaikuttanut merkitsevästi työvaiheen ajanmenekkiin.

Hakkuulaitteen vienti (s/runko) toisella harvennuksella ei ollut systemaattisesti hitaampaa tai nopeampaa ennakkoleimatussa harvennuksessa (kuva 20). Työvaiheen ajanmenekki oli mer-  
kitsevästi nopeampaa kuljettajalla B ja merkitsevästi hitaampaa kuljettajalla A. Kuljettajalla  
D ennakkoleimaus ei vaikuttanut hakkuulaitteen vientiin merkitsevästi.



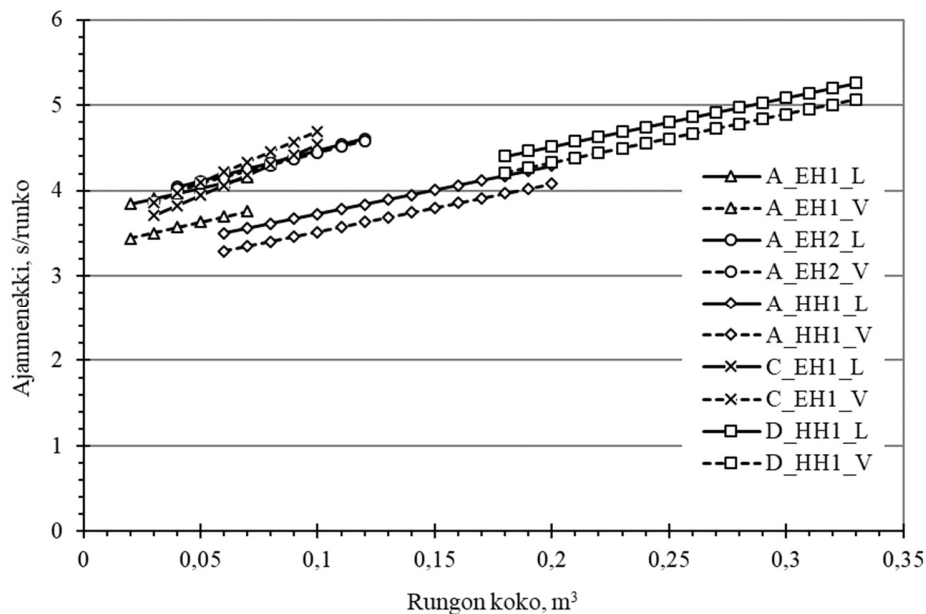
**Kuva 20.** Hakkuulaitteen viennin ajanmenekit toisella harvennuksella. Kuljettajan B hakkuulaitteen viennin ajanmenekki normaalissa hakkuutyössä leimikolla B\_HH2 on vertailutaso, johon muut ajanmenekit on suhteutettu. Pylväiden yläpuolella oleva musta vaakaviiva osoittaa ne leimikot, joissa ennakkoleimaus on vaikuttanut merkittävästi työvaiheen ajanmenekkiin.

Hakkuulaitteen viennin mediaaniarvojen tarkastelu antoi samansuuntaisen tuloksen kuin keskiarvotarkastelu. Mediaaniarvot eivät ole systemaattisesti korkeampia tai matalampia keskiarvoihin verrattuna. Hakkuulaitteen viennin (s/runko) keskihajonnassa ei tapahtunut merkittävää tai yhdensuuntaista muutosta ennakkoleimatun ja normaalin hakkuun välillä. Ero oli suurin leimikolla B\_HH2, jossa keskihajonta oli 1,00 s pienempi leimatussa käsittelyssä. Ero oli pienemmillään vain 0,04 s, kuljettajalla D.

Hakkuulaitteen vientiaikaa eivät selittäneet muut tekijät kuin käsittelyvaihtoehto ja kuljettaja. Työvaiheen ajanmenekki korreloi puun tilavuuden kanssa noin puolessa (7/16 kpl) leimikoiden ja käsittelyvaihtoehtojen yhdistelmistä melkein merkitsevästi ( $p < 0,05$ ). Korrelaation merkitsevyys tai suunta (+/-) ei ollut systemaattista kummassakaan käsittelyvaihtoehdossa. Vastaavasti vientiajan ja poistuman tiheyden välillä ei ollut riippuvuutta. Kuljettajalla A hakkuulaitteen vienti oli nopeampaa toisella harvennuksella, kun taas kuljettajalla B hakkuuta-  
van vaikutus oli päinvastainen.

### 6.1.2 Kaato ja tuonti

Kaadon ja tuonnin ajanmenekki riippui kuljettajasta ja ajanmenekki korreloi koko aineistossa positiivisesti puun tilavuuden kanssa ( $r_{xy} = 0,20$ ). Kuljettajilla A, C ja D kaadon ja tuonnin sekä puun tilavuuden välinen korrelaatio oli yksisuuntainen (+) ja merkitsevä ( $p < 0,01$ ) kaikissa käsittelyvaihtoehtojen ja leimikoiden yhdistelmissä. Kaadon ja tuonnin ajanmenekki-mallit laadittiin kuljettajille A, C ja D (kuva 21, taulukko 4). Samalla leimikolla käsittelyvaihtoehtojen mallinnettuna, mallien kulmakertoimien luottamusvälit olivat päällekkäiset kaikissa tapauksissa.



**Kuva 21.** Rungon koon vaikutus kaadon ja tuonnin ajanmenekkiin. Mallien graafinen esitys perustuu rungokoon ala- ja yläkvartiileihin tutkimusleimikoilla. Taulukossa 4 on esitetty kuvaajien yhtälöt.

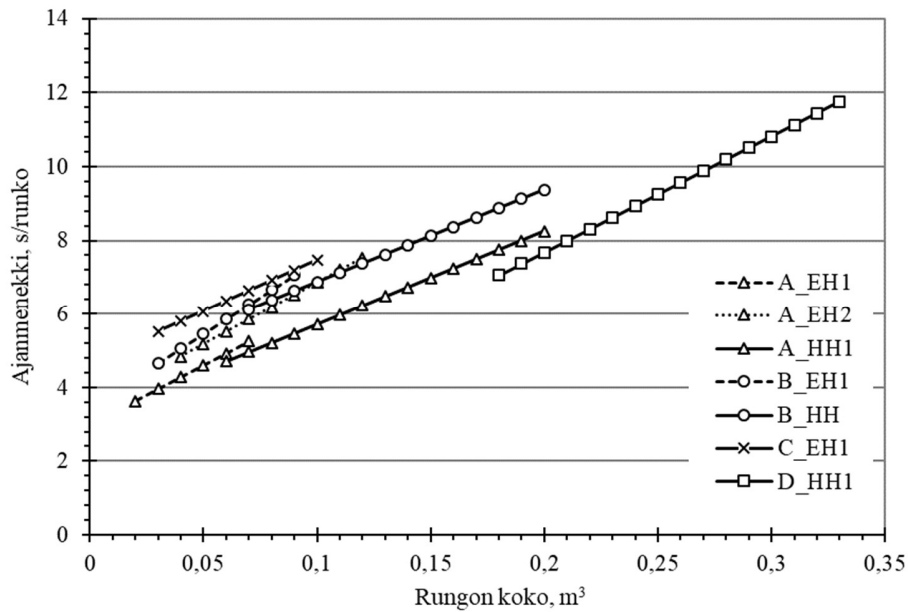
**Taulukko 4.** Kaadon ja tuonnin runkokohtaisen ajanmenekin valemuuttujamallit kuljettajille A, C ja D. Malleissa perustaso on leimattu käsittely.

$y = a + bx + ck$							
jossa							
$y$ = kaadon ja tuonnin runkokohtainen aika, s							
$x$ = rungon koko, m <sup>3</sup>							
$k$ = valemuuttuja = 1, jos käsittelyvaihtoehto on leimattu, muulloin 0							
$a$ = vakio							
$b, c$ = muuttujien kertoimet							
	n	Kerroin	Kertoimen estimaatti	Keskivirhe	t-testi		R <sup>2</sup>
					t-arvo	p-arvo	
A_EH1	707	$a$	3,315	0,086	38,422	<0,001	0,052
		$b$	6,270	1,473	4,258	<0,001	
		$c$	0,401	0,081	4,944	<0,001	
A_EH2	364	$a$	3,729	0,117	31,811	<0,001	0,085
		$b$	7,117	1,250	5,695	<0,001	
		$c$	0,027	0,112	0,243	0,808	
A_HH1	370	$a$	2,953	0,124	23,868	<0,001	0,143
		$b$	5,631	0,735	7,658	<0,001	
		$c$	0,209	0,106	1,971	0,049	
C_EH1	938	$a$	3,498	0,110	31,692	<0,001	0,091
		$b$	11,939	1,260	9,477	<0,001	
		$c$	-0,151	0,099	-1,534	0,125	
D_HH1	247	$a$	3,188	0,293	10,873	<0,001	0,106
		$b$	5,688	1,095	5,195	<0,001	
		$c$	0,193	0,168	1,153	0,250	

Ennakkoleimauksella oli merkitsevä vaikutus kaadon ja tuonnin ajanmenekkiin leimikoilla A\_EH1 ja A\_HH1 (valemuuttujien kertoimissa  $c$  t-testin havaittu testisuureen  $p$ -arvo < 0,05), kun puun tilavuus oli otettu huomioon. Kuljettajalla B kaadon ja tuonnin ajanmenekki ei korreloinut merkitsevästi puun tilavuuden kanssa. Esimerkiksi normaalissa hakkuussa leimikolla B\_HH1 myös lineaarisen mallin selityssaste ( $R^2$ ) oli hyvin pieni, vain  $6 \times 10^{-7}$ . Koska kuljettajalla B kaadon ja tuonnin mallintaminen ei ollut perusteltua, työvaiheen ajanmenek-kieroja tutkittiin keskiarvolukujen perusteella. Kaadon ja tuonnin ajanmenekki oli merkitsevästi 0,4 s suurempi normaalissa hakkuussa leimikolla B\_HH2 ( $n = 289$ ,  $U = 8594$ ,  $p = 0,016$ ). Leimikoilla B\_EH1 ja B\_HH1 työvaiheen ajanmenekissä ei ollut merkitsevää eroa käsittelyvaihtoehtojen välillä ( $n = 543$  ja  $487$ ,  $U = 35147$  ja  $27314$ ,  $p = 0,362$  ja  $0,323$ ).

### 6.1.3 Prosessointi

Prosessointiaika riippui puun tilavuudesta, kuljettajasta ja puulajista. Hakkuutapa tai käsittelyvaihtoehto eivät keskimäärin vaikuttaneet prosessointiaikaan. Prosessointiaikaa selittivät parhaiten lineaariset mallit (kuva 22). Kuljettajalla B yksittäisten tutkimusleimikoiden aineisto on yhdistetty toisella harvennuksella.



**Kuva 22.** Rungon koon vaikutus leimikon pääpuulajin prosessointiaikaan. Kuvaajat on esitetty ainoastaan normaalille hakkuulle, koska käsittelyvaihtoehtojen välinen tasoero on suurimmassa osassa tapauksia pieni ja ei-merkittävä. Taulukossa 5 on esitetty kuvaajien yhtälöt.

**Taulukko 5.** Prosessoinnin runkokohtaisen ajanmenekin valemuuttujamallit. Malleissa perustaso on leimattu käsittely. Yhtälöt ovat samaa muotoa kuin kaadon ja tuonnin malleissa (kts. taulukko 4).

	n	Kerroin	Kertoimen estimaatti	Keskivirhe	t-testi		R <sup>2</sup>
					t-arvo	p-arvo	
A_EH1	703	<i>a</i>	2,983	0,068	43,885	< 0,001	0,531
		<i>b</i>	32,326	1,169	27,653	< 0,001	
		<i>c</i>	-0,082	0,062	-1,324	0,186	
A_EH2	358	<i>a</i>	3,485	0,124	28,041	< 0,001	0,656
		<i>b</i>	33,788	1,316	25,677	< 0,001	
		<i>c</i>	0,101	0,116	0,876	0,382	
A_HH1	365	<i>a</i>	3,188	0,110	29,040	< 0,001	0,791
		<i>b</i>	25,331	0,684	37,035	< 0,001	
		<i>c</i>	0,137	0,092	1,479	0,140	
B_EH1	434	<i>a</i>	3,431	0,117	29,365	< 0,001	0,544
		<i>b</i>	40,387	1,807	22,352	< 0,001	
		<i>c</i>	-0,334	0,098	-3,405	0,001	
B_HH	588	<i>a</i>	4,377	0,120	36,592	< 0,001	0,598
		<i>b</i>	24,981	0,855	29,211	< 0,001	
		<i>c</i>	0,055	0,091	0,599	0,550	
C_EH1	816	<i>a</i>	4,680	0,100	46,662	< 0,001	0,465
		<i>b</i>	27,907	1,096	25,453	< 0,001	
		<i>c</i>	-0,511	0,088	-5,792	< 0,001	
D_HH1	239	<i>a</i>	1,419	0,294	4,825	< 0,001	0,766
		<i>b</i>	31,324	1,134	27,634	< 0,001	
		<i>c</i>	0,412	0,166	2,475	0,014	

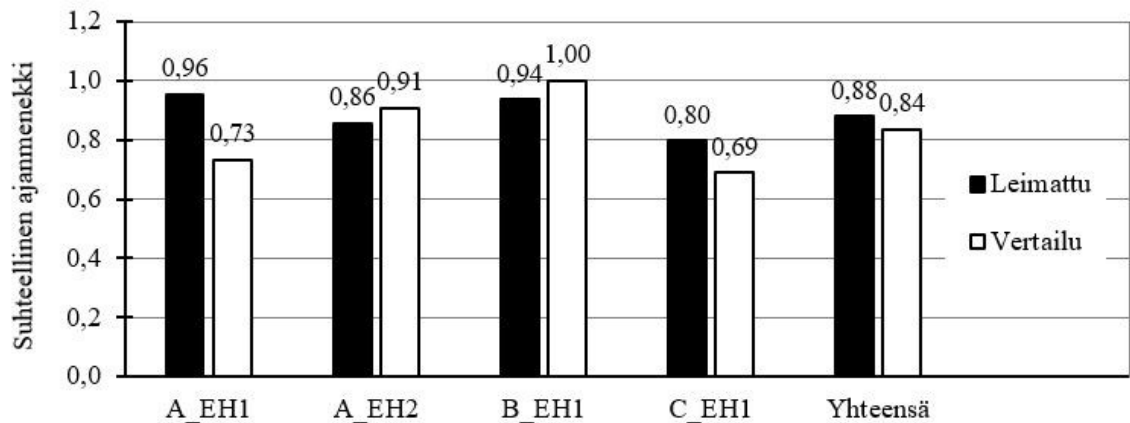
Puun tilavuuden lisäksi käsittelyvaihtoehto selitti prosessoinnin ajanmenekkiä merkitsevästi kuljettajilla C ja D sekä leimikoilla B\_EH1. Valemuuttujamallien käsittelyvaihtoehtoon liittyvän parametrin (*c*) t-testin havaitun p-arvon perusteella ennakkoleimauksella ei ollut tilastollisesti merkitsevää vaikutusta prosessointiaikaan kuljettajalla A tai kuljettajan B toisella harvennuksella.

#### 6.1.4 Siirtyminen

Ennakkoleimauksella ei ollut vaikutusta keskimääräiseen siirtymisaikaan (*s*) suurimmassa osassa tutkimusleimikoita (6/8 kpl). Keskimääräinen siirtymisaika oli leimatussa käsittelyssä merkitsevästi suurempi leimikolla A\_EH1 ja merkitsevästi pienempi leimikolla B\_HH2. Mann Whitneyn U-testin tulokset (*n*, *U*, *p*) on esitetty liitteessä 4.

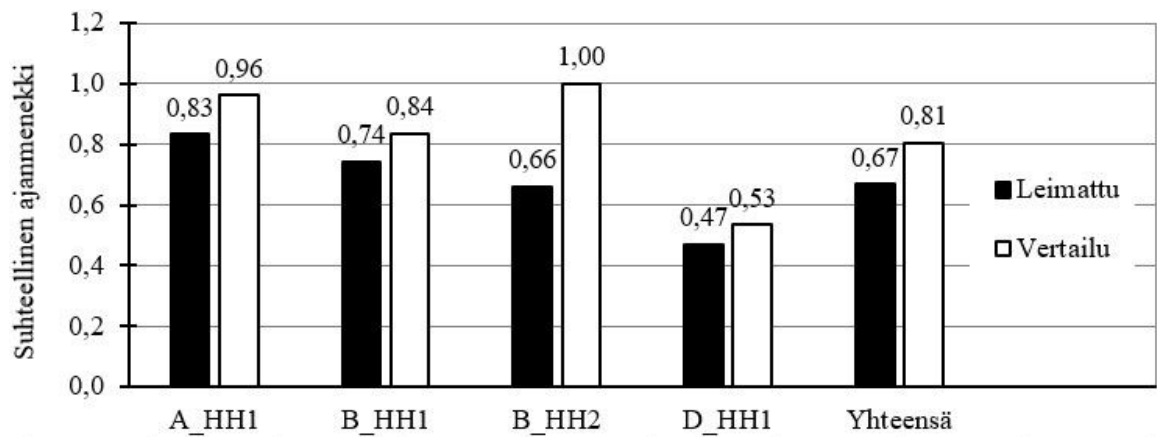


Runkokohtainen siirtymisaika ensiharvennuksella ei ollut systemaattisesti pienempi tai suurempi ennakkoleimatusta harvennuksessa (kuva 23). Kuljettajalla A runkokohtainen siirtymisaika oli männikön harvennuksessa suurempi ja koivikon harvennuksessa pienempi kuin normaalissa hakkuussa. Kuljettajalla B runkokohtainen siirtymisaika pieneni ja kuljettajalla C kasvoi ennakkoleimatusta ensiharvennuksessa.



**Kuva 23.** Runkokohtainen siirtymisaika ensiharvennuksella. Kuljettajan B siirtymisaika normaalissa hakkuussa on vertailutaso, johon muut ajanmenekit on suhteutettu.

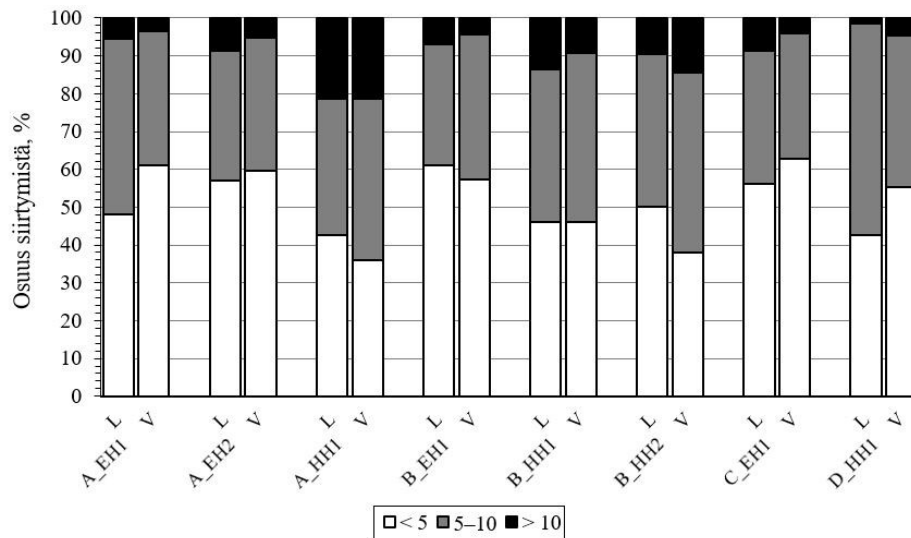
Runkokohtainen siirtymisaika toisella harvennuksella oli systemaattisesti pienempi leimatuilla koealoilla kuin vertailukoealoilla (kuva 24).



**Kuva 24.** Runkokohtainen siirtymisaika toisella harvennuksella. Kuljettajan B siirtymisaika leimikolla B\_HH2 on vertailutaso, johon muut ajanmenekit on suhteutettu.

Kaikilla ensiharvennusleimikoilla pitkien siirtymien (> 10 s) osuus oli suurempi (keskimäärin 3 %) ennakkoleimatusta harvennuksessa kuin normaalissa harvennuksessa. Vastaavasti

lyhyiden siirtymien ( $< 5$  s) osuus oli keskimäärin 4 % pienempi leimatussa ensiharvennuksessa. Ensiharvennuksella lyhyet, alle 5 sekuntia kestävät siirtymät olivat yleisimpiä, ja niiden osuus oli 48–61 % kaikista siirtymistä molemmissa käsittelyissä. Toisella harvennuksella sekä alle 5 sekuntia että 5–10 sekuntia kestävät siirtymät olivat n. 40–50 % kaikista siirtymistä (kuva 25). Käsittelyvaihtoehtojen väliset erot siirtymien suhteellisissa osuuksissa eivät olleet systemaattisia yhdessäkään luokassa.



**Kuva 25.** Siirtymien osuudet ajanmenekkiluokittain (s).

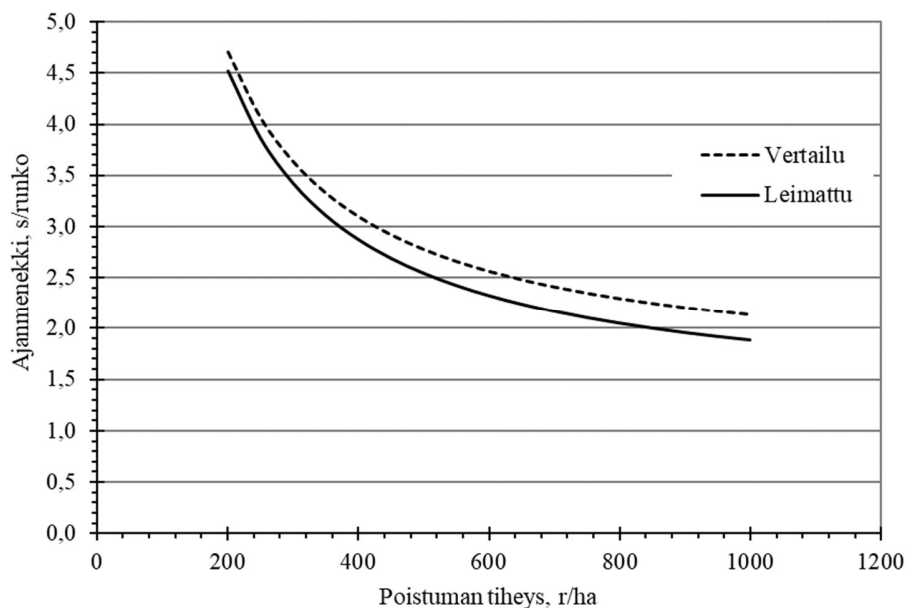
Ennakkoleimaus lähes poikkeuksetta pienensi runkokohtaista siirtymisaikaa, kun erisuuresta poistuman tiheydestä johtuvia teoreettisia ajanmenekkieroja verrattiin tutkimuksessa havaittuihin ajanmenekkieroihin (taulukko 6). Ainoastaan kuljettajan C ennakkoleimatussa harvennuksessa siirtymisaika kasvoi suhteessa enemmän kuin teoreettisella mallilla laskien. Vertailun perusteella ennakkoleimaus pienensi runkokohtaista siirtymisaikaa keskimäärin 17 %.

**Taulukko 6.** Ennakkoleimauksen teoreettinen vaikutus siirtymisaikaan. Siirtymisaika on laskettu Kuiton ym. (1994) mallilla tutkimusleimikoissa havaittujen poistuman tiheyden arvoilla. Ajanmenekkieroa on vertailtu Kuiton ym. (1994) mallin arvojen ja todellisuudessa havaittujen arvojen välillä. ”Erotus, %” kertoo, kuinka monta prosenttia pienempi/suurempi siirtymisaika on ollut ennakkoleimatussa harvennuksessa verrattuna oletusarvoon normaalissa hakkuussa.

	Ajanmenekki Kuiton ym. (1994) mukaan, s/r		Ajanmenekkiero, tämä tutkimus / Kuiton ym. (1994) mukaan		
	L	V	s	%	Erotus, %*
A_EH1	6,3	4,8	0,6/1,5	30/32	-1
A_EH2	6,4	5,4	-0,1/0,9	-6/17	-23
A_HH1	11,4	12,0	-0,7/-0,6	-14/-5	-8
B_EH1	6,3	4,7	-0,2/1,6	-6/34	-41
B_HH1	10,7	8,3	-0,5/2,4	-11/29	-40
B_HH2	10,3	11,5	-1,7/-1,2	-34/-10	-24
C_EH1	4,6	4,3	0,3/0,4	16/9	6
D_HH1	11,6	11,2	-0,3/0,3	-12/3	-15

\*Erotus tässä tutkimuksessa havaitun ja Kuiton ym. (1994) mallilla lasketun ajanmenekkieron välillä ei vastaa viereisestä sarakkeesta ”%” saatavia arvoja kaikissa tapauksissa pyöristysten takia.

Poistuman tiheys (r/ha) selitti runkokohtaista siirtymisaikaa tilastollisesti merkitsevästi ( $p < 0,01$ , taulukko 7). Molemmassa käsittelyvaihtoehdoissa siirtymisajan muutos poistuman tiheyden suhteen oli likimäärin sama, mutta käsittelyjen välillä oli tasoero (kuva 26). Ennakkoleimaus laski runkokohtaista siirtymisaikaa samalla poistuman tiheydellä keskimäärin 0,2 s. Siirtymisaikamallien perusteella suhteellinen ajanmenekkiero käsittelyvaihtoehtojen välillä on ensiharvennuksella 11 % (poistuma 800 r/ha) ja toisella harvennuksella 6 % (poistuma 300 r/ha).



**Kuva 26.** Siirtymisaian riippuvuus poistuman tiheydestä. Alla kuvaajien yhtälöt.

**Taulukko 7.** Siirtymisaikamallit ennakkoleimatussa ja normaalissa harvennuksessa.

$$z = a + bz^{-1}$$

jossa

$z$  = siirtymisen runkokohtainen aika, s

$y$  = poistuman tiheys, r/ha

$a$  = vakio

$b$  = muuttujan kerroin

n	Kerroin	Kertoimen estimaatti	Keskivirhe	t-testi		R <sup>2</sup>
				t-arvo	p-arvo	
Vertailu						
20	<i>a</i>	1,487	0,409	3,635	0,002	0,748
	<i>b</i>	644,667	157,998	4,080	0,001	
Leimattu						
20	<i>a</i>	1,226	0,418	2,932	0,009	0,693
	<i>b</i>	659,661	138,057	4,778	< 0,001	

### 6.1.5 Puomin tuonti eteen

Puomin eteen tuonnin -osuus hakkuutyön tehoajanmenekistä oli keskimäärin 4 %. Puomin eteen tuonnin keskimääräinen ajanmenekki (s) ei poikennut merkitsevästi leimattujen ja vertailukoealojen välillä yhdelläkään tutkimusleimikolla. Puomin eteen tuonnin runkokohtainen ajanmenekki oli ennakkoleimatussa harvennuksessa keskimäärin 0,1 s suurempi. Kuljettajilla

A ja C työvaiheen runkokohtainen ajanmenekki oli 0,2 s suurempi ennakkoleimatusta ensiharvennuksessa. Toisella harvennuksella kuljettajilla A ja D runkokohtainen ajanmenekkiero oli yhtä suuri ja samansuuntainen. Kuljettajalla B ero työvaiheen runkokohtaisessa ajanmenekissä oli alle 0,1 s käsittelyvaihtoehtojen välillä ensiharvennuksella. Toisella harvennuksella työvaiheen ajanmenekki oli leimatusta harvennuksessa 0,1 s korkeampi leimikolla B\_HH1 ja 0,4 s matalampi leimikolla B\_HH2.

### 6.1.6 Hakkuutyön kokonaisajanmenekki ja tuottavuus

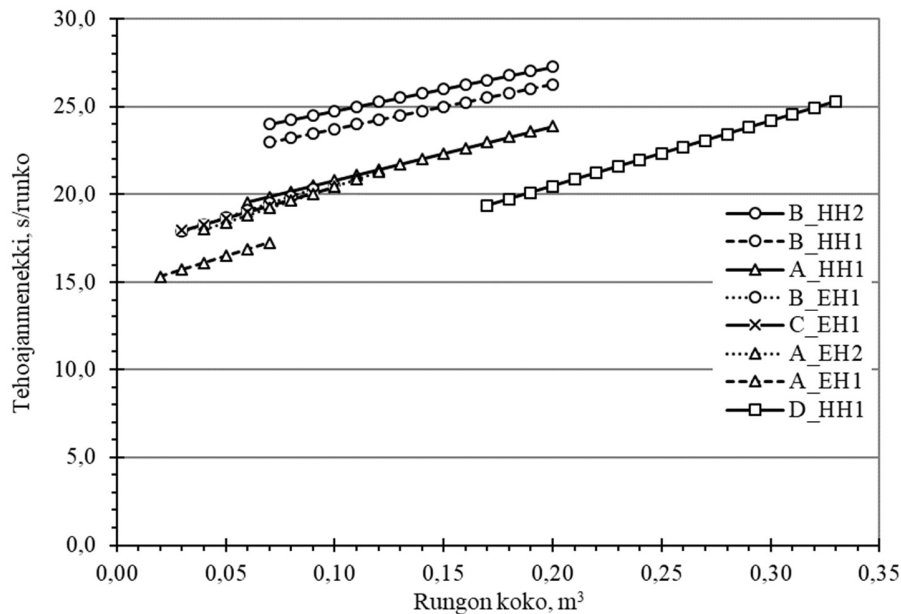
Ennakkoleimatun harvennuksen keskimääräinen tehoajanmenekkirakenne vastasi likimäärin normaalia harvennusta molemmissa hakkuutavoissa (taulukko 8). Erot työvaiheiden suhteellisissa osuuksissa olivat keskimäärin 1–3 % tehoajanmenekistä. Hakkuulaitteen viennin ja siirtymien osuus tehoajanmenekistä oli yhteensä 39/42 % (L/V) ensiharvennuksella ja 41/41 % toisella harvennuksella.

**Taulukko 8.** Työvaiheiden keskimääräiset osuudet (%) hakkuun tehoajanmenekistä. Keskiarvoissa leimikoiden A\_EH1 ja A\_EH2 sekä B\_HH1 ja B\_HH2 tulokset on yhdistetty. Vaihteluväli kertoo työvaiheen suhteellisen osuuden minimin ja maksimin tutkimusleimikoiden kesken. Häiriöiden ja järjestelytöiden osuus tehoajanmenekistä on 2 % molemmissa hakkuutavoissa.

Hakkuutapa	Työvaihe	Leimattu, %		Vertailu, %	
		Keskiarvo	Vaihteluväli	Keskiarvo	Vaihteluväli
EH	Hakkuulaitteen vienti	22	[18–26]	22	[21–26]
	Kaato ja tuonti	21	[18–24]	20	[17–23]
	Prosessointi	35	[30–45]	34	[30–41]
	Puomin tuonti eteen	5	[2–7]	4	[3–6]
	Siirtyminen	15	[11–20]	18	[13–23]
HH	Hakkuulaitteen vienti	28	[27–30]	30	[29–32]
	Kaato ja tuonti	24	[23–28]	23	[23–26]
	Prosessointi	31	[26–33]	31	[29–35]
	Puomin tuonti eteen	3	[1–6]	3	[1–5]
	Siirtyminen	12	[11–14]	11	[9–13]

Hakkuun tehoajanmenekki samalla rungon koolla vaihteli normaalissa hakkuussa tutkimusleimikoiden välillä (kuva 27). Ensiharvennuksessa kuljettaja A oli muita kuljettajia tehokkaampi. Kuljettajalla A runkokohtainen tehoajanmenekki oli männikössä keskimäärin 16,4

s, ja koivikossa 18,4 s rungon koolla 0,06 m<sup>3</sup>. Toisessa harvennuksessa kuljettaja D oli tehokkain. Leimikolla D\_HH1 runkokohtainen tehoajanmenekki oli 18,1 s rungon koolla 0,15 m<sup>3</sup>. Järjestelytöiden ja häiriöiden keskimääräinen runkokohtainen ajanmenekki oli ensiharvennuksella 0,4 s ja toisella harvennuksella 0,5 s.



**Kuva 27.** Hakkuun tehoajanmenekki normaalissa harvennuksessa. Selitteet on esitetty järjestyksessä hitaimmasta hakkuutyöstä nopeimpaan.

Ennakkoleimauksen vaikutus hakkuun tehoajanmenekkiin oli leimikkokohtaista (taulukko 9). Kuljettajalla B ennakkoleimattu harvennus oli nopeampi tehdä kuin normaali harvennus. Kuljettajalla A ennakkoleimaus ei nopeuttanut hakkuutyötä. Leimikolla A\_EH1 ennakkoleimatun harvennuksen tehoajanmenekki oli 5,4 % korkeampi. Leimikoilla A\_EH2 ja A\_HH1 sekä kuljettajalla D ennakkoleimauksella ei ollut merkittävää vaikutusta hakkuun tehoajanmenekkiin. Kuljettajalla C ennakkoleimaus nopeutti hakkuutyötä 3,0 %.

**Taulukko 9.** Työvaiheiden runkokohtaiset ajanmenekit rungon koolla 0,06/0,15 m<sup>3</sup> (EH/HH). Ero-% kertoo, kuinka monta prosenttia pienempi/suurempi (-/+) on ennakkoleimatun harvennuksen tehoajanmenekki tutkimusleimikon keskimääräisellä järeysjakaumalla laskien.

		Hakkuulait- teen vienti		Kaato ja tuonti		Prosessointi	Puomin tuonti eteen	Siirty- minen	Teho- ajan- menekki	Ero-%
s/runko										
A_EH1	L	5,1		4,1	***	4,8	1,0	2,4	17,8	5,4
	V	5,2		3,7		4,9	0,8	1,8	16,9	
A_EH2	L	5,7		4,2		5,6	1,0	2,1	19,0	0,9
	V	5,6		4,2		5,5	0,8	2,3	18,8	
A_HH1	L	5,4	***	4,0	*	7,1	1,5	4,3	22,8	1,9
	V	4,7		3,8		7,0	1,3	4,9	22,3	
B_EH1	L	4,9	***	4,7		5,5	0,2	2,3	18,1	-5,6
	V	5,5		4,6		5,9	0,2	2,5	19,1	
B_HH1	L	5,4	***	5,0		8,2	0,7	3,8	23,7	-5,6
	V	6,2		5,1		8,2	0,6	4,3	25,0	
B_HH2	L	5,4	**	4,5	*	8,2	0,5	3,4	22,5	-15,9
	V	6,3		4,9		8,2	0,9	5,1	26,0	
C_EH1	L	5,3	***	4,1		5,8	0,7	2,0	18,0	-3,0
	V	5,8		4,2		6,4	0,5	1,7	19,0	
D_HH1	L	4,2		4,2		6,5	0,8	2,4	18,8	0,6
	V	4,5		4,0		6,1	0,7	2,7	18,6	
Yhteensä										
EH	L	5,2		4,2		5,5	0,6	2,1	18,1	-3,3
	V	5,6		4,2		5,5	0,6	2,3	18,7	
HH	L	5,0		4,7		8,0	0,9	3,4	22,6	-1,7
	V	5,2		4,7		8,0	0,9	3,6	23,0	

\* = p < 0,05; \*\* = p < 0,01; \*\*\* = p < 0,001

Kaadon ja tuonnin runkokohtainen keskimääräinen ajanmenekki oli ensiharvennuksella 4,2 s ( $v = 0,06 \text{ m}^3$ ) ja toisella harvennuksella 4,7 s ( $v = 0,15 \text{ m}^3$ ). Vastaavat ajanmenekit kuljet-  
täjille yhteisen männyn prosessoinnin mallin (taulukko 10) mukaan olivat 5,5 s ja 8,0 s.

**Taulukko 10.** Kuljettajille yhteiset kaadon ja tuonnin sekä männyn prosessoinnin ajanmenekkimallit. Yhteiset mallit on johdettu valemuuttujamalleista, jotka ottavat huomioon kuljettajakohtaisen vaihtelun. Mallien perustaso on kuljettaja D.

$$y = a + bx$$

Jossa

$y$  = työvaiheen runkokohtainen ajanmenekki, s

$x$  = rungon koko, m<sup>3</sup>

$a$  = vakiotermi,  $a_v + \beta$

$b$  = muuttujan kerroin

$a_v$  = valemuuttujamallin vakiotermi

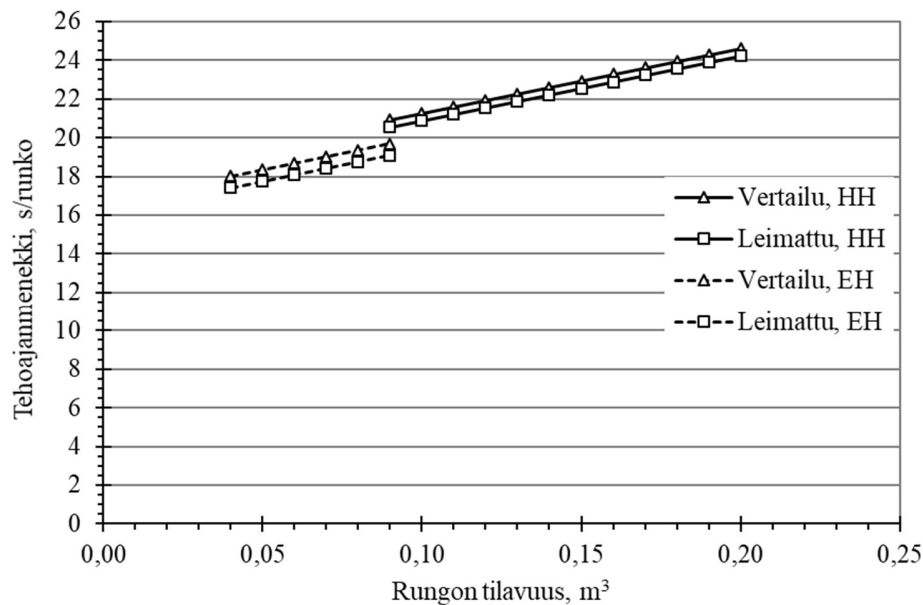
$\beta$  = kuljettajien A, B ja C keskimääräinen poikkeama perustasosta,  $\frac{\sum_{i=1}^n k \times c_i}{n}$  ( $k = 1$ )

$c_1, c_2, c_3$  = valemuuttujien kertoimet

Parametri	Estimaatti	Keskihajonta	t-testi	
			t-arvo	p-arvo
Kaato ja tuonti				
$a_v$	3,376	0,143	23,548	< 0,001
$b$	5,320	0,447	11,897	< 0,001
$c_1$	0,138	0,126	1,093	0,270
$c_2$	1,011	0,125	8,118	< 0,001
$c_3$	0,458	0,131	3,485	< 0,001
		$R^2 = 0,106$	$n = 3266$	
Prosessointi				
$a_v$	2,394	0,113	21,229	< 0,001
$b$	28,085	0,369	76,064	< 0,001
$c_1$	0,679	0,100	6,787	< 0,001
$c_2$	1,611	0,096	16,707	< 0,001
$c_3$	1,968	0,103	19,163	< 0,001
		$R^2 = 0,738$	$n = 3145$	

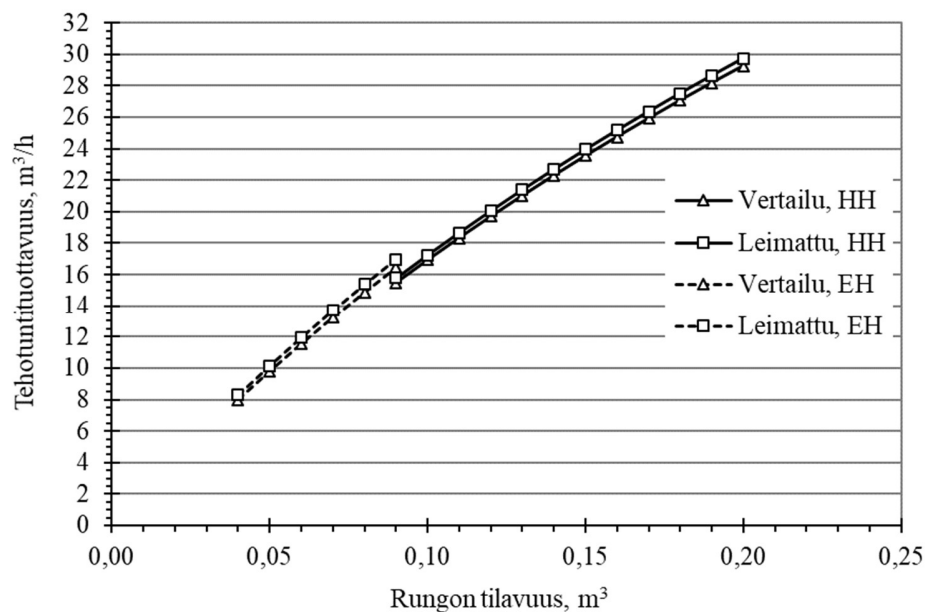
Ennakkoleimaus keskimäärin nopeutti hakkuutyötä, kun kuljettajien tulokset laskettiin yhteen ja poistuman tiheyden vaihtelu huomioitiin siirtymisaikamallilla. Hakkuun runkokoh-  
taiset tehoajanmenekit erosivat toisistaan ensiharvennuksella 0,6 s ja toisella harvennuksella  
0,4 s (kuva 28). Vastaavasti suhteellinen tehoajanmenekkiero käsittelyjen välillä oli 3,4 % ja  
1,8 %.





**Kuva 28.** Hakkuutyön tehoajanmenekki ennakkoleimatussa ja normaalissa harvennuksessa hakkuutavoittain. Siirtymisajat on laskettu poistuman tiheyden arvoilla 800 r/ha (EH) ja 300 r/ha (HH).

Hakkuutyön tehotuntuottavuus kasvoi suhteessa rungon kokoon voimakkaammin kuin tehoajanmenekki. Kuljettajille yhteisessä tuottavuusmallissa tuottavuus on ensiharvennuksella 12,3/11,9 m³/h (L/V) ja toisella harvennuksella vastaavasti 24,4/23,8 m³/h, kun rungon koko on 0,06/0,15 m³ (kuva 29).



**Kuva 29.** Hakkuutyön tehotuntuottavuus ennakkoleimatussa ja normaalissa harvennuksessa hakkuutavoittain.

Hakkuutyön käyttöajanmenekki saatiin, kun tehoajanmenekkiin lisättiin ensiharvennuksella 4,6 s/runko ja toisella harvennuksella 3,7 s/runko. Ajanmenekkilisäys jakautui seuraavasti: alikasvoksen raivaus 8,8/3,5 % (EH/HH) ja alle 15 min keskeytykset 16,3/12,8 % tehoajanmenekistä. Laskennallisen käyttöajanmenekin perusteella ennakkoleimaus tehosti hakkuutyötä ensiharvennuksella 2,8 % ja toisella harvennuksella 1,5 %. Harvennushakkuun tuottavuuteen (m<sup>3</sup>/h) vaikutti merkittävästi leimikon järeysjakauma. Kuljettajan A männikön ensiharvennuksen tuottavuus oli tilavuudella mitattuna (m<sup>3</sup>/ha) pienin, mutta valmistettujen runkojen määrällä mitattuna (r/h) suurin (taulukko 11). Toisella harvennuksella kuljettajan D tuottavuus (m<sup>3</sup>/h) oli yli 1,5-kertaa suurempi kuin muilla kuljettajilla keskimäärin. Ennakkoleimatun harvennuksen tuottavuusvaikutus tutkimusleimikoilla oli -0,4–2,3 m<sup>3</sup>/h. Leimatussa käsittelyssä tuottavuus oli korkeampi sekä pinta-alalla että tilavuudella mitattuna leimikoilla B\_EH1, B\_HH1 ja C\_EH1. Keskimäärin leimatussa käsittelyssä hakkuupinta-ala tuntia kohden oli 0,04 ha suurempi.

**Taulukko 11.** Hakkuutyön käyttötuntituottavuus tutkimusleimikoilla. Harmonisoidun järeysjakauman mediaanijäreys kuvaa poistettujen puiden kokoa. Hakkuutavoittain esitetyissä tuottavuusluvuissa (yhteensä) poistuman tiheys on vakioitu eri käsittelyissä.

	Mediaanijäreys, m <sup>3</sup>	r/h		m <sup>3</sup> /h		ha/h	
		L	V	L	V	L	V
A_EH1	0,04	164	171	8,2	8,5	0,258	0,197
A_EH2	0,07	147	148	12,3	12,4	0,233	0,193
A_HH1	0,10	138	140	18,9	19,2	0,551	0,618
B_EH1	0,05	159	152	9,9	9,5	0,248	0,170
B_HH1	0,10	135	129	16,3	15,6	0,484	0,300
B_HH2	0,12	139	122	19,4	17,1	0,462	0,495
C_EH1	0,05	154	150	11,3	11,0	0,170	0,153
D_HH1	0,25	137	137	34,6	34,8	0,563	0,536
<b>Yhteensä</b>							
EH	0,05	158	154	10,6	10,3	0,197	0,192
HH	0,14	135	133	21,9	21,6	0,449	0,442

## 6.2 Korjuujälki

### 6.2.1 Harvennusvoimakkuus

Ensiharvennuskohteiden keskimääräinen runkoluku hakkuun jälkeen oli männiköissä 946/834 r/ha (L/V), ja koivikossa 680/679 r/ha. Toisella harvennuksella keskimääräinen

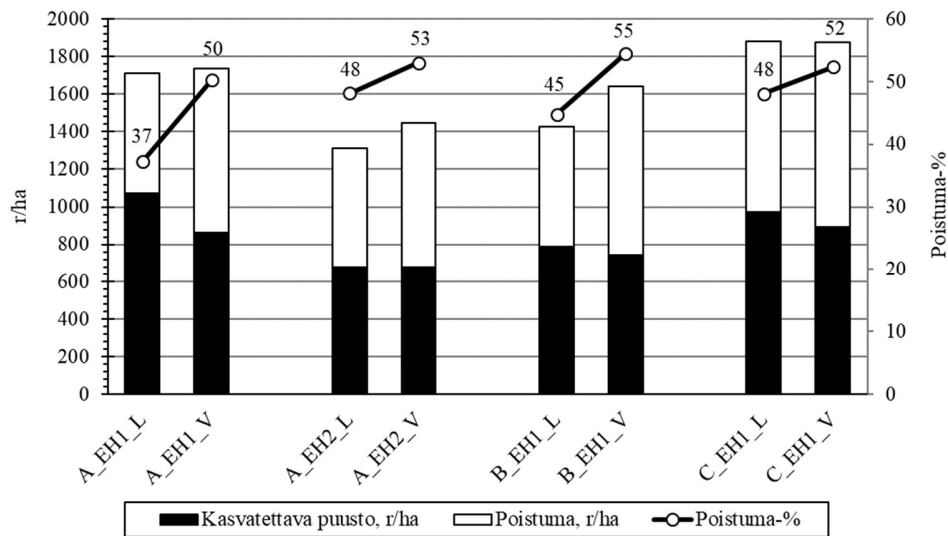
pohjapinta-ala hakkuun jälkeen oli 14,5/12,8 m<sup>2</sup>/ha (L/V) ja valtapituus oli 18,1/18,2 m. Kasvatettavan puuston keskiläpimitta tai valtapituus eivät eronneet systemaattisesti käsittelyvaihtoehtojen välillä (taulukko 12).

**Taulukko 12.** Kasvatettavaa puustoa kuvaavat tunnuksat. Taulukossa on lihavoitu ne lukuarvot, joita käytetään harvennusvoimakkuuden arviointiin.

	Runkoluku, kpl/ha		Keskiläpimitta, mm		Pohjapinta-ala, m <sup>2</sup> /ha		Valtapituus, m	
	L	V	L	V	L	V	L	V
A_EH1	<b>1075</b>	<b>863</b>	126	127	13	11	13,7	13,7
A_EH2	<b>680</b>	<b>679</b>	149	144	12	11	17,5	18,8
A_HH1	527	470	184	183	<b>14</b>	<b>12</b>	<b>17,0</b>	<b>16,8</b>
B_EH1	<b>788</b>	<b>745</b>	148	133	13	10	13,6	13,1
B_HH1	600	492	174	173	<b>15</b>	<b>12</b>	<b>17,4</b>	<b>16,9</b>
B_HH2	509	444	186	195	<b>14</b>	<b>14</b>	<b>18,0</b>	<b>18,6</b>
C_EH1	<b>975 (18*)</b>	<b>894 (17*)</b>	150	149	17	16	15,4	15,2
D_HH1	406	346	214	218	<b>15</b>	<b>13</b>	<b>19,9</b>	<b>20,4</b>

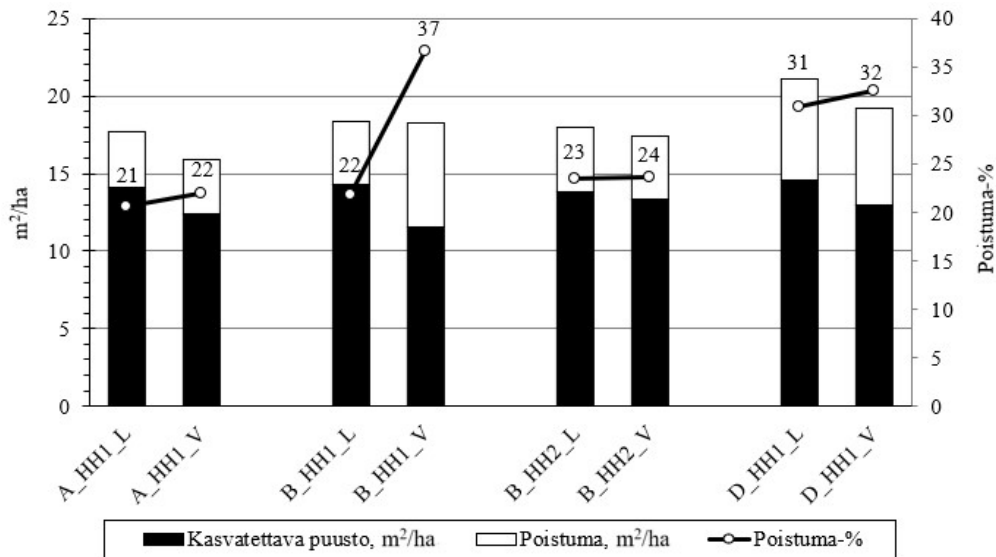
\*Lehtipuuprosentti

Ensiharvennuksella harvennusvoimakkuus oli keskimäärin suurempi normaalissa hakkuussa. Leimikolla A\_EH1 kasvatettavan puuston määrä oli normaalissa hakkuussa 8 % alle metsänhoidon suositusten mukaisen alarajan. Samalla leimikolla ennakkoleimattu harvennus oli suositusten mukaisissa rajoissa. Kuljettajalla B kasvatettavan puuston runkoluku oli ennakkoleimatussa harvennuksessa 13 % ja normaalissa harvennuksessa 19 % alle suositusten mukaisen alarajan. Koivikon ensiharvennuksessa (A\_EH2) jäävän puuston määrä oli 4 % alle alarajan molemmissa käsittelyvaihtoehdoissa. Kuljettajan C harvennuksessa harvennusvoimakkuus oli suositusten mukainen riippumatta käsittelystä. Normaalissa hakkuussa lähtöpuuston runkoluvusta poistettiin noin puolet (kuva 30). Ennakkoleimatussa harvennuksessa poistuma-% oli alle 50.



**Kuva 30.** Ensiharvennusleimikoiden lähtöpuusto ja harvennusvoimakkuus.

Toisella harvennuksella kasvatettavan puuston määrä oli systemaattisesti alle suositusten mukaisen tavoitetason molemmissa käsittelyissä. Normaalissa hakkuussa pohjapinta-ala hakkuun jälkeen oli keskimäärin 18 % alle suositusten mukaisen alarajan (15–16 m<sup>2</sup>/ha). Myös ennakkoleimatussa harvennuksessa jäävä puusto oli alle alarajan, mutta keskimääräinen alitus oli pienempi (7 %). Ennakkoleimatussa harvennuksessa jäävän puuston määrä oli systemaattisesti suurempi kuin normaalissa hakkuussa, mutta myös lähtöpuuston pohjapinta-ala oli tutkimusleimikoilla A\_HH1 ja D\_HH1 2 m<sup>2</sup>/ha korkeampi. Ennakkoleimatussa harvennuksessa jäävän puuston pohjapinta-alan vaihteli välillä 14–15 m<sup>2</sup>/ha ja normaalissa harvennuksessa vastaavasti 12–14 m<sup>2</sup>/ha. Pohjapinta-alalla mitattuna poistuma-% oli yhden yksikön tarkkuudella yhtä suuri ennakkoleimatussa ja normaalissa harvennuksessa kolmella leimikolla. Leimikolla B\_HH2 poistuma-%:n ero käsittelyjen välillä oli kuitenkin suurempi, 15 % (kuva 31).



**Kuva 31.** Toisen harvennuksen lähtöpuusto ja harvennusvoimakkuus.

Ensiharvennusleimikoilla kasvatettavan puuston runkoluvun keskihajonta oli keskimäärin 99 r/ha leimatuilla koealoilla ja 86 r/ha vertailukoealoilla. Toisella harvennuksella vastaavat luvut olivat 71 r/ha ja 76 r/ha. Ensiharvennuksella kasvatettavan puuston pohjapinta-alan keskihajonta oli leimatussa käsittelyssä keskimäärin 1,6 m²/ha ja 2,1 m²/ha normaalissa hakkuussa. Toisella harvennuksella keskihajonta oli molemmissa käsittelyissä keskimäärin 2,7 m²/ha.

### 6.2.2 Puuvalinta

Molemmissa käsittelyissä hakkuu tehtiin alaharvennusperiaatteen mukaisesti, koska jäävän puuston keskiläpimitta oli 16–39 % suurempi kuin poistuman keskiläpimitta. Ennakkolei-  
mauksen vaikutus poistuman keskiläpimittaan oli leimikkokohtaista. Poistuman läpimittaja-  
kaumat eivät eronneet käsittelyvaihtoehtojen välillä systemaattisesti toisistaan. Ennakkolei-  
matun ja normaalin harvennuksen poistuman läpimittajakaumat olivat yhdenmukaiset leimi-  
koilla A\_HH1, B\_EH1, C\_EH1 ja D\_HH1 (taulukko 13). Läpimittajakaumien muodot ero-  
sivat toisistaan merkitsevästi leimikoilla A\_EH1, A\_EH2, B\_HH1 ja B\_HH2.

**Taulukko 13.** Poistuman läpimittajakaumien yhdenmukaisuus eri käsittelyvaihtoehdoissa (Kolmogorov-Smirnovin Z-testi).

	n	Z	p-arvo
A_EH1	885	1,468	0,027
A_EH2	480	1,748	0,004
A_HH1	469	1,08	0,194
B_EH1	570	1,195	0,115
B_HH1	555	1,493	0,023
B_HH2	345	2,275	< 0,001
C_EH1	1203	1,034	0,235
D_HH1	318	1,101	0,177

Kaksihaaraisuus oli selkeästi yleisin vikaisuus sekä lähtöpuustossa että jäävässä puustossa (taulukko 14). Hakkuun jälkeen kasvatettavassa puustossa oli kaksihaaraisia puita ennakkoleimatussa harvennuksessa keskimäärin 2 kpl/ha ja normaalissa harvennuksessa 1 kpl/ha. Toisella harvennuksella molemmissa käsittelyvaihtoehdoissa kaksihaaraisia puita säästyí keskimäärin 1 kpl/ha. Yli 80 % kaikista kaksihaaraisista puista hakattiin molemmissa käsittelyissä.

**Taulukko 14.** Kaksihaaraisten puiden esiintyvyys.

	Lähtötilanne, r/ha		Hakattu, kpl			Hakkuussa säästynyt, kpl		
	L	V	L	V	Yhteensä	L	V	Yhteensä
A_EH1	7	5	4	3	7	0	0	0
A_EH2	25	30	8	10	18	1	0	1
A_HH1	6	1	7	0	7	0	1	1
B_EH1	5	3	2	1	3	0	0	0
B_HH1	15	24	11	17	28	1	1	2
B_HH2	22	19	11	11	22	3	1	4
C_EH1	13	23	6	11	17	3	2	5
D_HH1	0	2	0	1	1	0	0	0
Yhteensä	12	13	49	54	103	8	5	13

Hakkuussa säästyí kaksihaaraisten puiden lisäksi hyvin vähän muita vikaisuuksia tai sairaita puita. Muista vikaisuuksista ennakkoleimatuilla koealoilla havaittiin yksi mutkapuu (B\_HH1). Vertailukoealoilla oli yhteensä 8 normaalista poikkeavaa puuta: kaksi mutkaista (1 kpl/A\_EH2, 1 kpl/B\_HH1), kolme tervasrososta kärsivää (3 kpl/A\_HH1, kts. kuva 32), ja kolme pystyoksaista puuta (3 kpl/A\_EH2).



**Kuva 32.** Kasvatettavaa puustoa toisen harvennuksen vertailukoealoilla. Kuvissa keskellä kaksiahaarainen puu leimikolla B\_HH2 (vas.) sekä tervasrososta kärsivän puun tyvi leimikolla A\_HH1 (oik.).

### 6.2.3 Ajouratunnukset

Ajouraväli ensiharvennuksella oli kaikilla tutkimusleimikoilla molemmissa käsittelyissä keskimäärin suurempi kuin suositusraja (minimi 20 m). Toisella harvennuksella ajouravälin vaihtelu oli suurempaa kuin ensiharvennuksella (taulukko 15). Leimikolla B\_HH1 normaalissa hakkuussa keskimääräinen ajouraväli oli alle 20 metriä. Leimikolla A\_HH1 ajouravälit olivat pääosin useita metrejä suositusrajaa suurempia. Leimikolla A\_HH1 normaalin hakkuun ajouravälit voitiin laskea vain yhdeltä koealaparilta. Loput kaksi koealaa eivät muodostaneet koealaparia, josta ajouraväli oltaisiin voitu laskea. Vastaavantyyppinen rajoite oli leimikolla D\_HH1.

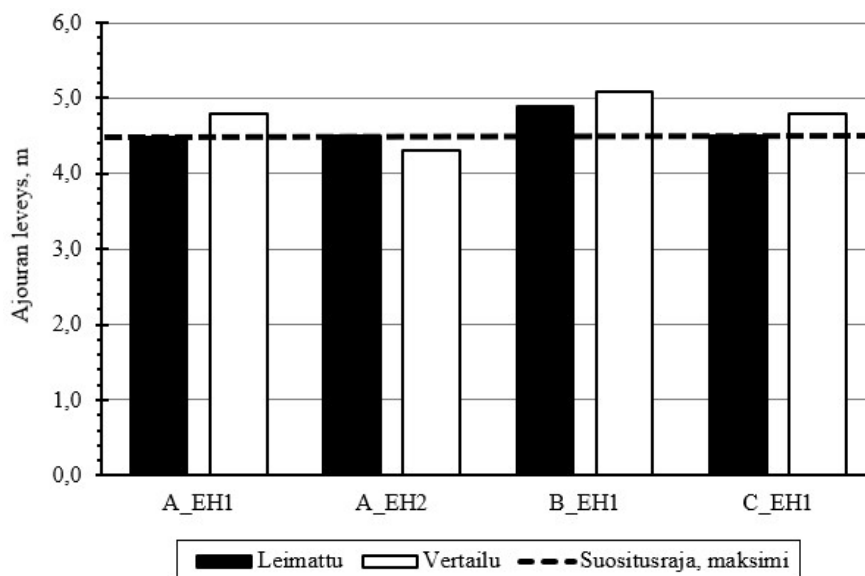
**Taulukko 15.** Ajouravälin tunnusluvut tutkimusleimikoilla. Ensiharvennusleimikoiden rivit on liha-voitu.

	n		Keskiarvo, m		Keskihajonta, m		Moodi, m	
	L	V	L	V	L	V	L	V
A_EH1	37	42	20,8	22,5	1,4	2,8	21,0	20,5**
A_EH2	29	19	20,9	22,1	3,2	1,5	19,5	22,5
A_HH1	72	37	23,7	29,0*	6,0	2,6	26,5**	27,0
B_EH1	32	21	22,4	22,1	1,7	5,3	22,5	22,5
B_HH1	40	66	21,8	18,7	3,0	4,6	21,5	18,5**
B_HH2	46	38	21,7	20,4	3,3	1,7	19,5	19,5
C_EH1	59	29	21,2	21,0	1,6	2,3	21,5	21,5
D_HH1	46	10	25,1	26,4*	4,1	1,7	21,0**	27,5

\*Ajouraväliä ei ole laskettu kaikilta koealoilta, koska osa koealoista ei rajoitu kummaltakaan sivulta toiseen samaa käsittelyvaihtoehtoa edustavaan koealaan.

\*\*Moodille ei ole tarkkaa lukuarvoa.

Keskimääräinen ajouraleveys oli hieman yli suositusrajan (maksimi 4,5 m). Leimikolla B\_EH1 suositusraja ylittyi molemmissa käsittelyvaihtoehdoissa (kuva 33).



**Kuva 33.** Keskimääräinen ajouraleveys ensiharvennusleimikoilla.

### 6.3 Kuljettajien palaute ja puuvalinnan opastuksen tarve

Ennakkoleimaus ei kuljettajien mielestä vaikeuttanut hakkuutyön tekemistä. Kuljettajien B, C ja D mielestä hakkuutyö oli helpompaa, kun poistettavat puut oli merkitty. Sen sijaan kuljettajan A mukaan ennakkoleimaus ei helpottanut, eikä vaikeuttanut hakkuutyötä.



Kaikkien kuljettajien mielestä poistettavien puiden merkintä oli riittävän selkeä. Hakkuissa säästy yhteensä 7 leimattua puuta. Leimattu puu korvattiin leimaamattomalla puulla kolme kertaa. Syitä leimatun puun korvaamiseen olivat 1) teknisesti hankala sijainti (2 kpl/EH, kuljettaja A) ja 2) korjuuvaurion ”paikkaaminen” (1 kpl/HH, kuljettaja B). Loput neljä puuta jäivät havaitsematta (kuljettajat B ja C). Leimaamattomia puita ei poistettu ajouran ulkopuolelta. Videolta tunnistettiin, että leimikoilla A\_EH1 ja A\_EH2 ajouran varresta poistettiin leimaamaton puu kolme kertaa ja leimikolla B\_EH1 yhden kerran.

Ensiharvennuksella kuljettajat C ja A kokivat, että ennakkoileimauksesta oli hyötyä työn tekemisen kannalta (taulukko 16). Kuljettaja B ei kokenut hyötyvänsä ennakkoileimauksesta. Poistettavien puiden etukäteisvalinta vaikutti kuljettajan B mukaan työn luonteeseen negatiivisesti. Kuljettaja A oli ainoa, joka havaitsi ennakkoileimauksen välillä hankaloittavan hakkuun teknistä toteutusta.

**Taulukko 16.** Kuljettajien palaute ennakkoileimauksesta ensiharvennuksella.

	Hyötyjä	Haittoja
A	"Ajouraväli pysyy hyvänä, kun on ennakkoileimattu."	"Ykköspuukasoja tuli helpommin ennakkoilematuilla koealoilla. Voi olla semmoinenkin tilanne, että kun on paljon samanarvoisia puita, niin suunnittelee poistettavat puut kasan paikan perusteella. Leimauksella ei osata huomioida kasan paikkaa - joku puu jää eteen, mikä estää jonkun rungon tekemistä samalle kasalle. Joskus olisin normaalikorjuussa ottanut toisen puun tieltä pois."
B	-	"Työn luovuus ja mielekkyys hävisi."
C	"Ei tarvitse miettiä, eikä havainnoida puun laatua."	-

Toisella harvennuksella kuljettajan D kokemat hyödyt ennakkoileimauksesta vastasivat kuljettajan C kokemuksia ensiharvennuksesta (taulukko 17). Kuljettajan D mukaan ennakkoileimatussa harvennuksessa puita poistettiin paikoin kauempaa ajourasta kuin normaalissa hakkuussa. Leimatussa käsittelyssä kuljettaja D koki joskus hyödylliseksi poiketa ajouran keskilinjasta (kuva 34). Kuljettaja A koki ennakkoileimauksesta olevan hyötyjä, muttei haittoja. Kuljettajalla B suhtautuminen ennakkoileimaukseen oli sama kuin ensiharvennuksella.

**Taulukko 17.** Kuljettajien palaute ennakkoleimauksesta toisella harvennuksella.

	Hyötyjä	Haittoja
A	"Hyötyjä toisella harvennuksella oli se, että laadukkaampaa työtä saati tehtyä säällä kuin säällä."	-
B	-	"Työn luovuus ja mielekkyys hävisi."
D	"Ei tarvitse miettiä puun laatua ja on vain helpompi tehdä."	"Olisin ottanut puita joskus lähempää ja säästännyt vastaavanlaatuista puita (kauempana). Suoralla puomilla tekemistä pitää välttää."



**Kuva 34.** Kuljettajan D poikkeaminen ajouran keskijonasta leimatulla koealalla. Harmaa nuoli osoittaa uran keskikohdan ja suunnan.

Kuljettajat A, C ja D kokivat, että puun latvuksesta tai rungon yläosasta saatavan lisätiedon hyöty olisi kohtalainen tai merkittävä. Kuljettaja B koki, että puun laadun ennakkotiedosta olisi vain vähäinen hyöty. Ensiharvennuksella kuljettajat kokivat puuvalintaan vaikuttavan keskimäärin yhtä paljon sekä puun laadun että järeiden. Kolme neljästä kuljettajasta keskittyi havainnoimaan rungon yläosan ja latvuksen laatua valitessaan poistettavia puita. Kuljettaja C kertoi arvioivansa puun laatua koko puun pituudelta. Toisella harvennuksella kaikkien kuljettajien mielestä puuvalintaa ohjaa puun järeyttä selvemmin puun laatu. Kolme neljästä kuljettajasta sanoi arvioivansa puun laatua koko rungon pituudelta, mutta kuljettaja A kertoi keskittyvänsä havainnoimaan rungon yläosan ja latvuksen laatua.

Kuljettajien mukaan puun laatuominaisuuksia, joiden automaattinen tunnistaminen olisi hyödyllistä, olivat mm. kaksihaaraisuus, tervasroso ja mutka. Syynä valintoihin olivat sekä laatuviikojen yleisyys että niiden vaikea tunnistus. Kuljettajat C ja D kokivat, että lähtöpuuston epätasaisella tilajärjestyksellä on merkittävä vaikutus harvennusvoimakkuuteen. Kuljettajien A ja D mukaan myös lähtöpuuston laatu vaikuttaa kohtalaisesti harvennusvoimakkuuteen. Omavalvonta ei kuljettajien mukaan ohjannut harvennusvoimakkuutta.

Kuljettajien suhtautuminen puuvalintaa opastavaan järjestelmään ei ollut yhtä yksimielinen kuin harvennusvoimakkuuden seurantaan tarkoitettua järjestelmää kohti (taulukko 18). Kaikki kuljettajat olivat yksimielisiä siitä, että puuvalintaa opastavan järjestelmän käyttö parantaisi puunkorjuun laatua. Kaikki kuljettajat arvelivat puuvalintaa opastavan järjestelmän heikentävän kuljettajan kykyä suoriutua hakkuutyöstä itsenäisesti. Puuvalinnan opastuksen vaikutus työn tuottavuuteen tai työssä jaksamiseen jakoivat mielipiteitä. Kuljettaja A uskoi järjestelmän parantavan työssä jaksamista, muttei nostavan tuottavuutta. Kuljettajan C vastaukset olivat päinvastaiset. Kuljettaja B ei osannut arvioida tuottavuusvaikutusta, eikä uskonut työssäjaksamisen parantuvan. Kuljettaja D ei osannut ottaa kantaa järjestelmän tuottavuus- tai työssä jaksamisen vaikutuksiin.

**Taulukko 18.** Kuljettajien halukkuus käyttää puuvalinnan opastukseen tai harvennusvoimakkuuden seurantaan tarkoitettuja järjestelmiä.

Käyttäisitkö harvennusvoimakkuuden seurantaan tarkoitettua järjestelmää?			
	Kyllä	En	
A	X		
B	X		
C	X		
D	X		
Käyttäisitkö puuvalinnan opastukseen tarkoitettua järjestelmää?			
	Kyllä, jatkuvasti käyttäen	Kyllä, työn tukena	En lainkaan
A		X	
B			X
C		X	
D	X		

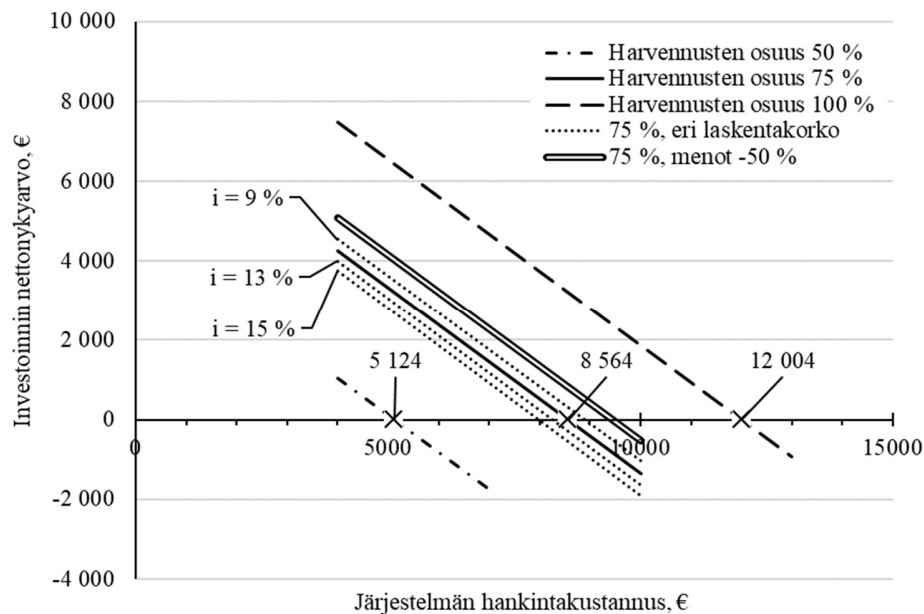
#### 6.4 Puuvalintaa opastavan järjestelmän kannattavuus

Hakkuutyön tehostumiseen perustuen ennakkoleimauksen kustannussäästöpotentiaali (€/h) on yhtä suuri kuin ennakkoleimauksen vaikutus hakkuutyön käyttöajanmenekkiin (ensiharvennuksella 2,8 % ja toisella harvennuksella 1,5 %). Kustannussäästön suuruus ennen menoja on 1566,68–3133,37 €/v riippuen harvennusten osuudesta (50–100 %) ja hakkuukoneen käyttötunneista. Harvennuskoneella, joka työskentelee päätehakkuilla vain 25 % käyttöajasta, kustannussäästö on 2350,03 € (taulukko 19).

**Taulukko 19.** Ennakkoleimauksesta saatava kustannussäästö hakkuukoneella, jolla harvennusten osuus hakkuista on 75 %.

Hakkuukoneen käyttö, h/v			Kustannussäästö ennen menoja		
Harvennukset	EH	1087,5	Käyttökustannus, €/h		50
	HH	1087,5	Kustannussäästö, €/v	EH (2,8 %)	1530,07
Päätehakkuu		725		HH (1,5 %)	819,95
Yhteensä		2900	Yhteensä, €/v		2350,03

Puuvalintaa opastava järjestelmä on kannattava investointi, jos järjestelmän hankintakustannus on enintään 5 000–12 000 € ja hakkuukoneen muuttuvat käyttökustannukset ovat 50 €/h. Järjestelmä ei ole kannattava investointi, jos harvennusten osuus on 75 % vuotuisesta hakkuumäärästä (h) ja järjestelmän hankintahinta on yli 8 564 € (kuva 35). Mikäli menot olisivat samassa tilanteessa vain puolet oletusarvosta eli 200 €, investoinnin nettonykyarvo kasvaisi 820 €. Vastaavalla harvennusten osuudella investoinnin nettonykyarvo on n. 4 300 €, jos järjestelmän hankintakustannukset olisivat vain 4 000 €.



**Kuva 35.** Puuvalintaa opastavan järjestelmän kannattavuuden riippuvuus hankintahinnasta, harvennusten osuudesta hakkuutyössä, vuosimenoista ja tuottovaatimuksesta. Kuvaajien ja x-akselin leikkauspiste on se hankintahinta, jolla investoinnin nettonykyarvo on 0 €. Oletuslaskentakorko (i) on 11 %.

Mitä suurempi on harvennusten osuus ja muuttuvat käyttökustannukset, sitä suurempi on järjestelmän maksimihankintahinta. Puuvalintaa opastavan järjestelmän maksimihankintahinta on n. 5 000–15 000 €, jos hakkuukoneen käyttökustannus olisi oletusarvosta poiketen välillä 50–60 €/h (taulukko 20). Järjestelmän maksimihankintahinta (nettonykyarvo = 0 €) on tasan 6 000 €, kun hakkuutyön muuttuvat kustannukset ovat 50 €/h ja harvennusten osuus 56 % käyttöajasta. Vastaavasti järjestelmän maksimihankintahinta on tasan 14 000 €, kun käyttökustannukset ovat 60 €/h ja harvennusten osuus käytötunneista on 95 %.

**Taulukko 20.** Hakkuukoneen käyttökustannusten vaikutus puuvalintaa opastavan järjestelmän maksimihankintahintaan.

Käyttökustannus, €/h	Kustannussäästö (netto), €/v			Maksimihankintahinta, €		
	50	55	60	50	55	60
$H_p^* = 50$	1 566,68	1 723,35	1 880,02	5 123,77	5 811,82	6 499,87
$H_p = 75$	2 350,03	2 585,03	2 820,03	8 564,01	9 596,08	10 628,15
$H_p = 100$	3 133,37	3 446,70	3 760,04	12 004,25	13 380,34	14 756,43
$H_p = 75$ , menot -50 %	2 350,03	2 585,03	2 820,03	9 442,36	10 474,43	11 506,50

\*Harvennusten osuus, %

Puuvalintaa opastava järjestelmä ei olisi taloudellisesti kannattava sijoitus, jos järjestelmän hankintahinta markkinoille tultaessa olisi n. 40 000 € (taulukko 21). Mikäli investointipäätöstä viivytettäisiin kaksi vuotta ja teknologian hinta tippuisi noin puoleen lähtötasosta, investointi olisi edelleen kannattamaton. Pidemmällä aikavälillä investointi muuttuisi kannattavaksi esitetyn hankintahintakehityksen perusteella. Investointijaksolla 4, jolloin teknologian saapumisesta markkinoille on kulunut kuusi vuotta, viiteensataan hakkuukoneeseen asennettuna investointi alentaisi puunkorjuun kokonaiskorjuukustannuksia n. 2,03 milj. €:n arvosta (0,9 % nykytasosta, sisältäen hakkuun ja lähikuljetuksen).

**Taulukko 21.** Skenaariolaskelma puuvalintaa opastavan järjestelmän tulevaisuuden hintakehityksestä 0–6 vuoden aikana teknologian markkinoille saapumisen ajanhetkestä. Hakkuutyön tuntikustannus on 50 € ja harvennusten osuus 75 % hakkuutyömäärästä (h).

	Investointijakso			
	1	2	3	4
<b>Järjestelmän hankintakustannukset, €</b>				
- Laitteistokustannukset	4 000,00	3 000,00	2 250,00	1 687,50
- Valmistuskustannukset	36 000,00	18 000,00	9 000,00	4 500,00
Hankintameno, yhteensä	40 000,00	21 000,00	11 250,00	6 187,50
<b>Järjestelmän jäännösarvo, €</b>				
- Sensorien jäännösarvo	0,00	0,00	0,00	0,00
- Muun teknologian jäännösarvo	4 500,00	2 250,00	1 125,00	562,50
Jäännösarvo, yhteensä	4 500,00	2 250,00	1 125,00	562,50
Tulot (kustannussäästö), €/v	2 350,03	2 350,03	2 350,03	2 350,03
Menot (ylläpitokustannukset), €/v	500,00	450,00	405,00	364,50
Tuottovaatimus, %	11,00	11,00	11,00	11,00
Nettonykyarvo, €	-29 446,08	-16 723,11	-2 529,57	4 069,23
Nettovaikutus (500 hakkuukonetta), €	-14 723 041	-8 361 553	-1 264 784	2 034 614

## 7 TULOSTEN TARKASTELU

### 7.1 Koejärjestely

Maastokokeisiin liittyy tuloksiin vaikuttavia epävarmuustekijöitä. Hakkuukoealojen metsiköörakenteeseen olivat vaikuttaneet aikaisemmat hakkuu- ja metsänhoitotoimenpiteet, luonnontuhot, kasvupaikan rehevyysvaihtelu sekä luontaisesti uudistuneet puut. Nämä tekijät yhdistettynä tutkimusleimikoiden vaihtelevaan topografiaan aiheuttivat sen, ettei eri käsittelyvaihtoehtoja edustavilla hakkuukoealoilla olosuhteet olleet täysin vakioituneet. Toisella harvennuksella aikaisempi ajouraverkosto määräsi koealojen sijoittelun. Ajouraväli ei ollut vakio,

mikä on vaikuttanut paikallisesti puiden ottoetäisyyteen ajouralta. Hakkuukoneita ei voitu keskittää samoille kohteille leimikoiden pinta-alarajoitteiden ja korjuun logistiikkavaatimusten takia. Osalla tutkimusleimikoista oli tehty ennakkoraivaus, jota ei olisi normaalisti tehty. Tutkimusolosuhteiden vaihtelu ja sen hallintaan liittyvät haasteet ovat metsäntutkimuksen ominaispiirre, joka tulee tiedostaa tuloksia tarkasteltaessa. Ainoastaan simulaattoriolosuhteissa eri olosuhdetekijöitä voidaan vakioda ja hallita (Heinimann 2007).

Koealojen valmistelussa käytettyä ennakkoleimausta ei voida pitää hakkuun ideaalitoteutuksena. Ennakkoleimaus tehtiin metsänhoidollisesta eikä korjuun näkökulmasta. Tutkimusleimikoilla A\_EH1 ja B\_HH1 havaittu ero jäävän puuston määrässä tarkoittaa sitä, että ennakkoleimaus ei aina vastannut sitä ratkaisua, jonka mukaan kuljettaja olisi itse harventanut. Ennakkoleimauksessa valta- tai lisävaltapuiden leimausta usein vältettiin riittävän puustopääoman säilyttämiseksi. Ennakkoleimauksen voimakkuutta ja puuvalintaa muuntelemalla oltaisiin voitu vaikuttaa hakkuutyön toteutukseen.

## **7.2 Aikatutkimus**

### ***7.2.1 Tulosten laskentamenetelmä***

Ennakkoleimauksen vaikutusta hakkuutyön ajanmenekkiin selvitettiin työvaiheittaisella kelloaikatutkimuksella. Jatkuva-aikaisen aikatutkimuksen tuloksena saatiin tarkka kuvaus hakkuutyön jakautumisesta eri työvaiheisiin. Mainittakoon, että aikatutkimuksen tuloksen on havaittu riippuvan kellotuksen tekijästä (Nuutinen ym. 2008). Kuitenkin työvaiheiden erottelu hakkuutyöstä on tehty yhdenmukaisesti kaikissa tutkimusleimikoiden ja käsittelyvaihtoehtojen yhdistelmissä, koska tutkimuksen tekijä on suorittanut koko aineiston kellotuksen. Tästä syystä työn menetelmää voidaan pitää luotettavana. Aineiston kokoa voidaan pitää tutkimuksen vaatimaan työmäärään nähden riittävänä.

Tutkimusolosuhdeperäisistä syistä (esim. poistuman tiheys) johtuen otoskoko vaihteli tutkimusleimikoiden välillä. Otskoon suuruus vaikuttaa tilastollisissa testeissä merkitsevien erojen syntymiseen. Tutkimuksen tilastollisen analyysin ja mallinnuksen tuloksista ei voida tehdä yksiselitteisiä johtopäätöksiä, koska erot käsittelyvaihtoehtojen ajanmenekeissä ovat

pieniä, vain sekunnin kymmenesosia. Eroja työvaiheiden ajanmenekeissä oltaisiin voitu tutkia myös keskiarvon luottamusvälien päällekkäisyyden perusteella tulosten luotettavuuden lisäämiseksi. Tutkimuksen tekijän vastuulla on kuitenkin lopulta päättää, mikä on tilanteeseen soveltuva menetelmä ja milloin kyseisellä muuttujalla on todellista vaikutusta tutkittavaan asiaan (Sirén 1998).

Kaadon ja tuonnin sekä prosessoinnin ajanmenekkiä selittivät parhaiten lineaariset mallit, kuten aikaisemmissakin tutkimuksissa (esim. Sirén 1998, Nurminen ym. 2006). Kaato- ja tuontiajasta puun tilavuus selitti hyvin pienen osan. Sirén (1998) onkin maininnut, että hakkuulaitteen viennin ja puun kaadon mallien selitysasteet ovat tyypillisesti pieniä. Kuljettajan B aineistossa kaadon ja tuonnin ajanmenekki ei riippunut puun tilavuudesta selvästi. Tätä on voinut selittää kuljettajan B työtapaa. Kuljettaja B valmisti yhdessä työpisteessä rungot usein vain toiselle puolelle uraa keskittäen kasoja. Hakkuulaitteen vienti ei korreloinut puun tilavuuden kanssa, mikä on todettu aikaisemminkin (Nurminen ym. 2006).

Hakkuutyön tehoajanmenekki saatiin laskemalla yhteen yksittäisten työvaiheiden ajanmenekit. Samalla leimikolla eri käsittelyvaihtoehtojen tehoajanmenekkimallien välillä vallitsi ainoastaan tasoero, koska kaadon ja tuonnin sekä prosessoinnin ajanmenekkiä selitettiin valemuuttujamalleilla. Menetelmän etu on kaikkien hakkuulaitteen viennin havaintojen säilyttäminen ja riippuvuussuhteiden tarkka tutkiminen. Tehoajanmenekki olisi voitu mallintaa vaihtoehtoisella menetelmällä, jossa runkokohtainen havainto muodostuu puun prosessoinnin, hakkuulaitteen viennin sekä kaadon ja tuonnin todellisten arvojen sekä muiden työvaiheiden keskiarvojen summasta. Menetelmän etu on sen yksinkertaisuus ja havaintojoukon käsitteleminen yhtenäisempänä. Toisaalta kun mallinnuksessa on mukana todellisena arvona hakkuulaitteen vienti, joka ei korreloi puun tilavuuden kanssa, tehoajanmenekkimallien selitysasteet ovat matalia. Esimerkiksi Sirénin ja Tantun (2001) tutkimuksessa vastaavien tehoajanmenekkimallien selitysasteet ( $R^2$ ) olivat 0,055–0,395. Eri laskentatavoilla voidaan päätyä eri tulokseen. On kuitenkin loogista olettaa, että tehoajanmenekki on yksittäisten työvaiheiden summa. Se, miten laskenta tulisi tehdä, ei ole olemassa sitovaa ohjesääntöä. Tämän tutkimuksen laskentaperuste on sama kuin viimeisimmässä hakkuutyön ajanmenekkirakennetta koskevassa suomalaisessa aikatutkimuksessa (Nurminen ym. 2006).



### ***7.2.2 Ennakkoleimauksen vaikutus hakkuutyön ajanmenekkiin***

Aikaisempaa tutkimustietoa ennakkoleimauksen vaikutuksesta harvennushakkuutyön tuottavuuteen on vähän. Mäkelän ym. (1988) tutkimuksessa ennakkoleimatun metsän harvennus oli ensiharvennuksella 10–12 % hitaampaa ja toisella harvennuksella 8–14 % hitaampaa. Kirjallisuudesta löytyi kaksi työvaiheittaista kelloaikatutkimusta, joissa ennakkoleimausta on käytetty. Kellogin & Bettingerin (1994) tulokset olivat samansuuntaisia tämän tutkimuksen kanssa: ennakkoleimatussa harvennuksessa hakkuulaitteen vienti oli 14 % nopeampaa ja siirtyminen 4 % nopeampaa kuin normaalissa harvennuksessa. Lisäksi työn suunnitteluun kului normaalissa harvennuksessa puolet enemmän aikaa. Toisaalta Lagesonin (1997) tutkimuksessa runkokohtainen siirtymisaika oli 15 % suurempi yläharvennuksella. Muista työvaiheista yhdistetty hakkuulaitteen vienti, kaato ja tuonti sekä prosessointi oli 3,5 % nopeampaa ennakkoleimatussa harvennuksessa. Erityisesti erot metsiköiden rakenteessa ja koejärjestelyssä heikentävät tulosten vertailukelpoisuutta.

Tämän tutkimuksen mukaan ennakkoleimaus vaikuttaa hakkuulaitteen viennin ja siirtymien ajanmenekkiin. Tulosta tukevat havaitut merkitsevät ajanmenekkierot sekä aikaisempi tutkimustieto siitä, että poistettavien puiden valinta tapahtuu edellisten työvaiheiden aikana (esim. Gellerstedt 2002). Muiden työvaiheiden osalta ennakkoleimauksella ei keskimäärin havaittu olevan vaikutusta hakkuutyön ajanmenekkiin. Tutkimusleimikoittain ja käsittelyvaihtoehdoittain tarkasteltuna ennakkoleimauksen vaikutus kaadon ja tuonnin tai prosessoinnin ajanmenekkiin ei riippunut rungon koosta. Valemuuttujamalleissa ajanmenekin tasoeroa kuvaava parametri oli tilastollisesti merkitsevä alle puolessa tutkimusleimikoista. Puomin eteen tuonnin ajanmenekkiero oli yli 0,1 s/r kuljettajilla A, C ja D sekä leimikolla B\_HH2. Työvaiheen ajanmenekki ei ollut systemaattisesti pienempi/suurempi ennakkoleimatussa harvennuksessa. Eroa selittänee poistuman tiheys, koska työvaiheen ajanmenekki oli aina suurempi siinä käsittelyssä, jossa poistuman tiheys oli pienempi.

Ennakkoleimaus nopeutti harvennushakkuuta keskimäärin 2,2 %. Lukuarvo on saatu koko aineiston keskiarvona ja tietyin oletuksin, joten tulos on suuntaa-antava. Hakkuulaitteen vienti ja siirtymät muodostivat n. 40 % harvennushakkuun tehoajanmenekistä. Mikäli tästä esimerkiksi 10 % kuluu poistettavien puiden valintaan, saadaan puuvalinnan opastuksen maksimipotentiaaliksi alle 4 %:n ajallinen säästö käyttöajanmenekissä. Tutkimustulokset

ovat linjassa tämän ajattelun kanssa siten, että ennakkoleimauksella saavutettu hyöty ei ollut poikkeuksellisen suuri. Tutkimuksessa ei saatu selville sitä, riippuuko ennakkoleimauksen ajanmenekkivaikutus hakkuutavasta. Ajanmenekkisäästö (s) olisi ollut molemmissa hakkuutavoissa keskimäärin yhtä suuri, jos esimerkiksi kuljettajan A toisella harvennuksella hakkuulaitteen vienti ei olisi ollut hitaampaa ennakkoleimatussa harvennuksessa.

Ennakkoleimauksen vaikutus hakkuutyön ajanmenekkiin riippui kuljettajasta. Ennakkoleimauksen vaikutuksen ja kuljettajan tuottavuuden välillä oli looginen riippuvuus. Kuljettajille A ja D ennakkoleimauksen vaikutus oli pienempi kuin vähemmän tuottaville kuljettajille B ja C. Kuljettajilla A ja D ennakkoleimaus ei vaikuttanut hakkuutyön tuottavuuteen merkittävästi toisin kuin kuljettajalla B. Kuljettajalla C ennakkoleimaus nopeutti hakkuulaitteen vientiä, mutta ei lyhentänyt runkokohtaista siirtymisaikaa. On huomattava, että uuden työmenetelmän opetteluun kuluu aikaa, eikä tutkimuskuljettajilla ollut mahdollisuutta totutella ennakkoleimatun metsikön harvennukseen ennen testihakkuuta.

Ennakkoleimaus nopeutti hakkuulaitteen vientiä 7–14 % kuljettajilla B, C ja D. Ennakkoleimaus ei vaikuttanut hakkuulaitteen vientiin kuljettajan A männikön ensiharvennuksessa, vaikka ennakkoleimatussa harvennuksessa kasvatettavan puuston määrä oli 200 r/ha suurempi. On kuitenkin mainittu, että kasvatettavan puuston varominen hidastaa ensiharvennustyötä (Kärhä ym. 2004). Koivikon ensiharvennuksessa (A\_EH2) kasvatettavan puuston tiheys oli yhtä suuri, eikä hakkuulaitteen vienti tästä huolimatta nopeutunut. Tämä osoittaa, että kuljettajalla A poistettavien puiden valintaan liittyvä päätöksenteko ei vaikuttanut työvaiheen joutuisuuteen. Ennakkoleimauksella oli poikkeuksellisesti merkitsevä vaikutus kaadon ja tuonnin ajanmenekkiin kahdella kuljettajan A harventamista leimikoista. Tutkimusleimikolla A\_EH1 tämä on johtunut kuljettajan A antaman palautteen perusteella erosta poistuman tiheydessä. Harvennusvoimakkuuden kasvattaminen olisi lisännyt paitsi samalle kasalle tehtävien runkojen lukumäärää myös kasoille käytettävissä olevaa tilaa. Siten ns. ykköskasojen syntymistä ei olisi tarvinnut pyrkiä välttämään. Leimikolla A\_HH1 kaato ja tuonti, mutta myös hakkuulaitteen vienti oli merkitsevästi hitaampaa ennakkoleimatussa harvennuksessa. Tähän on voinut vaikuttaa puiden ottoetäisyys. Kahdella koealaparilla uraväli oli keskimäärin jopa 27/29 m (L/V). Puun prosessointiaika oli merkitsevästi lyhyempi kuljettajien B ja C ennakkoleimatussa ensiharvennuksessa. On mahdollista, että ajanmenekkiero

syntyi poistettavien puiden valinnasta, joka on tapahtunut viimeisen katkaisusahauksen jälkeen, ennen latvaosan tiputtamista ja hakkuulaitteen vientiä. Toisaalta kuljettajan B toisella harvennuksella merkitsevää ajanmenekkieroa ei havaittu ja melkein merkitsevä prosessointiajan ero oli kuljettajalla D erisuuntainen. Ennakkoleimaus ei vaikuttanut keskimääräiseen siirtymisaikaan (s). Työpisteen sisällä tapahtuvat lyhyet siirtymät ja pitemmät työpistesiiirtymät esiintyivät lähes samassa suhteessa riippumatta käsittelystä. Ennakkoleimauksen ja siirtymisajan välisen yhteyden tutkimista hankaloitti erot poistuman tiheydessä. Ennakkoleimauksen vaikutusta runkokohtaiseen siirtymisaikaan ei voitu laskea Kuiton ym. (1994) mallilla, koska tässä tutkimuksessa siirtymisaikaa selitti paremmin eri yhtälö ja runkokohtainen ajanmenekki oli noin puolet pienempi kuin Kuiton ym. (1994) mukaan. Tutkimusongelman kannalta oleellinen tieto vertailussa oli se, että siirtymien (s/r) ajanmenekkieroa selitti useissa tapauksissa enemmän harvennusvoimakkuus kuin ennakkoleimaus. Tämän tutkimuksen siirtymisaikamallien mukaan ennakkoleimaus pienensi siirtymisaikaa. Samalla poistuman tiheydellä ennakkoleimatussa harvennuksessa siirtymisaika oli n. 11/6 % pienempi (EH/HH). On huomattava, että ennakkoleimauksen vaikutus siirtymisaikaan oli kuljettajariippuvaista. Kuljettajakohtaista mallinnusta varten aineistoa oli liian vähän.

### ***7.2.3 Työvaiheittaiset tutkimustulokset suhteessa aikaisempiin tutkimuksiin***

Aikaisemman tutkimustiedon perusteella voidaan saada suuntaa-antava käsitys tutkimuskuljettajien tuottavuustasosta. Yleisesti aika- ja tuottavuustutkimukset ovat keskenään heikosti vertailukelpoisia, koska tutkimuksissa leimikko-olosuhteet, käytetyt työmenetelmät ja hakkuukoneet, kuljettajien työkokemus sekä esimerkiksi katkontaohjeet ovat erilaisia (Nurminen ym. 2006). Tämän tutkimuksen tulokset eivät kuvaa keskimääräistä työtilannetta, vaan ne edustavat vain tiettyä vuodenaikaa ja korjuuolosuhdetta. Korjuuolosuhteet voivat vaikuttaa merkittävästi hakkuun tuottavuuteen (Väätäinen ym. 2005). Edellisten laajempien aikatutkimusten jälkeen on tapahtunut myös hakkuukoneiden huomattavaa tuottavuuskehitystä. Hakkuukoneiden tuottavuuden on havaittu kasvaneen 2000-luvulla suhteellisen nopeasti (Eriksson & Lindroos 2014).

Hakkuun tehoajanmenekkirakenne ei ollut poikkeuksellinen verrattuna aikaisempiin tutkimuksiin. Rajamäen ym. (1996), Sirénin (1998) sekä Sirénin ja Tantun (2001) mukaan prosessoinnin osuus on n. 50 % ja hakkuulaitteen viennin sekä kaadon ja tuonnin osuus yhteensä alle 40 % tehoajanmenekistä. Tässä tutkimuksessa tilanne oli päinvastainen, mutta vastaava kuin esimerkiksi Ovaskaisen ym. (2004) ja Nurmisen ym. (2006) mukaan. Siirtymien keskimääräinen osuus on voinut olla hieman korkeampi, n. 20 % (Kuitto ym. 1994, Rajamäki ym. 1996, Nurminen ym. 2006, Sirén & Tanttu 2001), selvästi korkeampi, yli 20 % (Kärhä ym. 2004) tai pienempi, alle 15 % (Ovaskainen ym. 2004, Sirén 1998) tehoajanmenekistä. Toisella harvennuksella siirtymisajan osuus hakkuun tehoajanmenekistä oli pienempi. Kärhän ym. (2004) tulos oli päinvastainen. Prosessoinnin ja siten myös muiden työvaiheiden suhteellisiin osuuksiin vaikuttaa valmistettujen runkojen keskikoko, joka oli tässä tutkimuksessa pieni. Edellisissä vertailuissa tehoajanmenekki on laskettu tarvittaessa uudelleen ilman alikasvoksen raivausta. Ainoastaan Rajamäen ym. (1996) tehoajanmenekin määritelmä on sama kuin tässä tutkimuksessa.

Työvaiheiden todellisia ajanmenekkiarvoja on raportoitu aikaisemmissa tutkimuksissa vain silloin, kun se on ollut tutkimusongelman kannalta oleellista. Tulosten vertailussa on tiedotettava, että työvaiheiden määritelmässä saattaa olla eroja tutkimusten välillä. Ovaskaisen ym. (2004) tutkimuksessa hakkuulaitteen vientiin kului vähintään 36 % enemmän aikaa kuin tässä tutkimuksessa. Vastaavasti kaatoon ja tuontiin kului noin kolmasosa enemmän aikaa, kun työvaiheen aikana tapahtunut siirtymä oli alle 3 metriä. Myös Sirénin (1988) tutkimuksessa hakkuulaitteen vientiin sekä puun kaatoon ja tuontiin kului yhteensä 28 % enemmän aikaa rungon koolla 0,06 m<sup>3</sup>. Nurmisen ym. (2006) mukaan hakkuulaitteen vientiin kuluu 11 % enemmän aikaa ja runkokohtainen siirtymisaika oli puolestaan 94 % suurempi kuin keskimäärin tässä tutkimuksessa. Sirénin (1998) tutkimuksessa runkokohtainen siirtymisaika oli pienimmilläänkin n. 3 s, kun poistuman tiheys oli yli 700 r/ha. Mainittakoon, että verrattuna Nurmisen ym. (2006) tuloksiin, männyn prosessointi oli 14 % tehokkaampaa rungon koolla 0,06 m<sup>3</sup>, huomioimatta latvaosan tiputtamiseen kuluvaa aikaa. Työvaiheiden tehokas suorittaminen merkitsi myös korkeaa hakkuutyön tuottavuutta. Historiallisesti aikaisempien tutkimuksien perusteella ei voida havaita tuottavuuden systemaattista kasvua, mikä yksin selittäisi tämän tutkimuksen korkeaa tuottavuustasoa. Rajamäen ym. (1996) mukaan harvennushakkuun käyttötuntituottavuus oli n. 13 m<sup>3</sup>/h rungon koolla 0,15 m<sup>3</sup>. Toisaalta Nurmisen ym.

(2006) tutkimuksessa käyttötuntituottavuus oli samalla tasolla (alle 10 m<sup>3</sup>/h rungon koolla 0,15 m<sup>3</sup>) kuin yli kymmenen vuotta aikaisemmin Kuiton ym. (1994) mukaan, kun käyttöajanmenekin muuntokertoimet olivat samat.

Tutkimuksessa ei ollut mukana ainoastaan erittäin kokeneita, vaan todennäköisesti keskimääräistä tuottavampia kuljettajia. Toisaalta kuljettajat ovat voineet kokea tutkimuksen kilpailutilanteena. Esimerkiksi Kuitto ym. (1994) havaitsivat, että seurantatutkimuksessa hakkuutyön ajanmenekki on 27,6 % suurempi kuin aikatutkimuksessa. Koetilanteen vaikutusta ei huomioitu, koska kuljettajia ohjeistettiin tekemään hakkuutyötä mahdollisimman normaaliin tapaan, minkä toteutumista voidaan kuitenkin epäillä. Kuljettajien välillä oli huomattavia tuottavuuseroja. Kuljettajalla B männikön ensiharvennushakkuutyö oli 15 % hitaampaa kuin kuljettajalla A samalla rungon koolla. Toisella harvennuksella kuljettajan D hakkuutyö oli jopa 34 % tehokkaampaa kuin kuljettajalla B. Eroja työvaiheiden keskimääräisissä ajanmenekeissä voi selittää paitsi liikenopeudet myös tutkimuskuljettajien työtapaa (Ovaskinen ym. 2004). Esimerkiksi poistetun puun prosessointi lähellä kantoa tai yhdenaikaiset siirtymät puun kaadon ja tuonnin sekä hakkuulaitteen viennin aikana nopeuttavat hakkuutyön tekoa. Myös eri toimintoihin ja työn suunnitteluun liittyvä hiljainen tieto, jonka määrä riippuu kuljettajasta, voi selittää tuottavuuseroja (Väätäinen ym. 2005). Tässä tutkimuksessa käytetyt hakkuukoneet olivat ominaisuuksiltaan hyvin samankaltaisia. Tutkimuksessa oli mukana vain järeitä harvennuskoneita, jotka ovat tehokkaampia käyttää (Eriksson & Lindroos 2014). Kuljettajien suorituskyykyyn on voinut vaikuttaa pyörivä ohjaamo, joka oli kaikissa tämän tutkimuksen hakkuukoneissa.

### **7.3 Korjuujälki**

Harvennuksen korjuujälkeä tutkittiin maastossa mittaamalla kasvatettavan puuston määrä ja inventoimalla vikaisten puiden lukumäärä. Ensiharvennuksella mitattiin myös ajouraleveys. Kasvatettavan puuston runkoluku, valtapituus ja keskiläpimitta pystyttiin todentamaan maastomittauksissa hyvin. Jälkimittaukskoalat perustettiin systemaattisesti ajouran varsiin. Puuston määrä oltaisiin voitu vaihtoehtoisesti mitata ajourien välissä vyöhykkeittäin. Tämä ei ollut mahdollista tutkimukseen käytettävillä resursseilla. Ajouravälit ja koalojen pinta-alat saatiin määritettyä paikkatietoanalyysillä tehokkaasti.

Aikaisemmissa tutkimuksissa (Yeon ja Stewart 2000, Grimm 2015) ennakkoleimauksen ei ole katsottu parantavan harvennusvoimakkuutta. Hakkuukoneenkuljettajalla ja ennakkoleimauksen tekijällä on oltava yhtenäinen näkemys oikeasta harvennusvoimakkuudesta, jotta harvennusvoimakkuuden vertailu ennakkoleimatun ja normaalin hakkuutyön välillä on järkevää. Ennakkoleimaus paransi harvennusvoimakkuutta, kun tarkastellaan kasvatettavan puuston määrää suhteessa metsänhoidon suositusten mukaiseen tavoitetasoon. Normaalit harvennukset olivat maltillisia, kun tarkastellaan poistumaprosenttia toisen harvennuksen tutkimusleimikoilla. Korjuun on sanottu olevan kaupallisesti kannattavaa vasta, kun kokonaispoistuma (hukkapuu mukaan lukien) on 50–60 m<sup>3</sup>/ha, jolloin myös lähtöpuuston tulisi olla saavuttanut 150–180 m<sup>3</sup>/ha runkotilavuuden (Penttilä ym. 2000). Edellisen määritelmän perusteella korjuu ei ollut kaupallisesti kannattavaa esimerkiksi leimikolla A\_HH1. Toisilla harvennuksilla lähtöpuuston pohjapinta-ala oli pienempi kuin suositusten mukainen harvennusraja. Lähtöpuustoltaan harvassa leimikossa ristiriita riittävän harvennuskertymän ja oikean harvennusvoimakkuuden välillä on väistämätön. Puunhankintaorganisaatiot voivat käyttää Tapion malleja muokattuina, joka saattaa osaltaan johtaa suositusta voimakkaampiin harvennuksiin (Poikela & Äijälä 2006). Liian voimakkaan ensiharvennuksen seuraus on alhainen lähtöpuuston määrä toisella harvennuksella. Ensiharvennuksilla ainespuiden runkoluku oli alle metsänhoidon suositusten mukaisen uudistamistiheyden, mikä selittynee heikosti uudistuneilla paikoilla. Harvoissa ja ryhmittäisissä metsissä poistumatiedon käyttäminen tulisi kiinnittää huomiota (Poikela & Äijälä 2006). Mikäli harvennuksen kannattavuutta halutaan parantaa, harvennusvoimakkuus voisi olla esimerkiksi n. 30 % pohjapinta-alasta tai n. 50 % runkoluvusta. Oikea harvennusvoimakkuus ei ole tilanteesta riippumaton. Voimakkaalla harvennuksella voidaan laskea korjuukustannuksia, pienentää sitoutuneen pääoman määrää, tuottaa nopeammin järeää tukkipuuta ja lyhentää metsän kiertoaikaa. Kuitenkin liian voimakas harvennus laskee männikön tilavuuskasvua välittömästi, ja kasvu tasaantuu vasta 10–15 vuotta harvennuksen jälkeen harventamattoman metsikön tasolle (Hynynen & Arola 1999). Harvennusvoimakkuuden seuranta on siis tärkeää, mutta oikean harvennusvoimakkuuden ja sen muuntelun taloudellisten seurausten tarkka määrittely on vaikeaa. Lopulta harvennuksen ajoitus ja toteutus perustuvat metsänomistajan tavoitteisiin.

Poistuman läpimittajakaumien ja poistuman sekä jäävän puuston välisen keskiläpimittaeron perusteella molemmissa käsittelyissä noudatettiin alaharvennusperiaatetta. Ensiharvennuksella jäävän puuston runkoluvun keskihajonta oli hieman suurempi ennakkoleimatussa harvennuksessa. Tämä voi kuvata suurempaa eroa jo lähtöpuustoltaan harvojen sekä keskimäärin tiheämmäksi jätettyjen paikkojen välillä ennakkoleimatussa harvennuksessa. Poistuman läpimittajakaumat eivät olleet käsittelyvaihtoehtojen välillä yhdenmukaiset kaikilla leimikoilla. Leimikoilla A\_EH1 ja B\_HH1 ero voi johtua poistuman tiheydestä. Ennakkoleimatussa harvennuksessa poistuma painottui pieniin läpimittaluokkiin enemmän kuin voimakkaampana toteutetussa vertailuhakkuussa. Myös lähtöpuuston ominaisuudet voivat selittää merkitsevän eron poistuman läpimittajakaumissa. Leimikolla A\_EH2 ennakkoleimatussa käsittelyssä puusto oli harvempaa ja järeämpää ja leimikolla B\_HH2 tilanne oli päinvastainen. Ensiharvennuksella poistettavia puiden luokittelu sijaintinsa perusteella uralla ja sen ulkopuolella sijaitseviin puihin olisi mahdollistanut tarkempien analyysien tekemisen.

Huonolaatuisten puiden lukumäärä hakkuun jälkeen oli pieni. Lähes kaikki hakkuukoealoilla olleet kaksihaaraiset puut poistettiin molemmissa käsittelyvaihtoehdoissa. Muita huonolaatuisia puita säästy normaalisissa harvennuksessa enemmän kuin ennakkoleimatussa harvennuksessa, mutta vain yksittäisiä kappaleita. Tähän on vaikuttanut osaltaan lähtöpuuston hyvä laatu. Syy huonolaatuisen puun säästämiseen voi olla lähtöpuuston vähäiset valikoimismahdollisuudet (Päivänen & Taipale 1981), esimerkiksi ajouran varressa. Hakkuussa poistamatta jääneiden kaksihaaraisten puiden hakkaaminen ei olisi ollut välttämättä perusteltua harvennusvoimakkuuden kannalta. Kaikki normaalissa harvennuksessa säästyneet tervasrosan sairastuttamat puut olisi pitänyt poistaa. Ennakkoleimauksen tekevällä toimihenkilöllä on mahdollisuus tarkastella puuta ja sen ympäristöä huolellisemmin kuin hakkuukoneenkuljettajan. Tästä syystä ennakkoleimauksen on havaittu parantavan puuvalintaa (Grimmin 2015). Myös Sirén (1998) havaitsi, että normaalissa harvennuksessa säästyy metsänhoidollisesti poistettavia puita, joiden lukumäärä kasvaa ajouralta pois päin mentäessä. Huonolaatuisemmilla leimikoilla ennakkoleimauksen vaikutus puuvalintaan olisi voinut tulla selvemmin esille. Korjuujälkimittaus olisi voitu tehdä tarkemmin, esimerkiksi luokittelemalla puiden oksaisuutta.

Ajouraväli ensiharvennuksella oli suositusten mukainen molemmissa käsittelyissä. Ajoura-  
leveys oli hieman tavoiteltua suurempi molemmissa käsittelyissä. Tavoitetta suurempi

ajouraleveys voi johtua puuston tilajärjestyksestä (Stödt ym. 2003). Korjuujälkimittauksessa ei inventoitu hakkuussa syntyneitä korjuuvaurioita, koska ennakkoileimauksesta sai tarvittaessa poiketa syntyneiden korjuuvaurioiden takia. Aineiston keruun ja käsittelyn aikana ei havaittu, että ennakkoileimaus lisäisi korjuuvaurioiden lukumäärää. Tutkimushakkuissa leimattu puu korvattiin ainoastaan yhden kerran leimaamattomalla puulla syntyneen korjuuvaurion takia.

#### **7.4 Kuljettajien haastattelu**

Tutkimuskuljettajien suhtautumisesta ennakkoileimaukseen ja puuvalintaa opastavaan järjestelmään ei voida tehdä yleistettäviä johtopäätöksiä, koska otoskoko on vain neljä kuljettajaa. Pienestä otoskoosta johtuen myös kysytyjen asioiden määrä haluttiin pitää pienenä. Vastauksen perusteella voidaan lähinnä pohtia niitä seikkoja, jotka tulisi ottaa huomioon puuvalintaa opastavan järjestelmän kehittämisessä. On huomattava, että ihmisillä on yksilöllinen kyky mieltää opastuksen muoto, hyödyllisyys ja tarve puunkorjuun eri tilanteissa (Ylimäki ym. 2012). Kuljettajien mielipiteen muodostamista on vaikeuttanut luultavasti se, että älykkäitä opastavia järjestelmiä ei ole käytössä.

Kuljettajien palautteen ja aikatutkimusvideolta laskettujen poikkeuksellisten puuvalintojen lukumäärän perusteella ennakkoileimaus soveltuu koneelliseen puunkorjuuseen. Tutkimuskuljettajien B, C ja D antamien vastausten perusteella ennakkoileimaus helpotti hakkuutyön tekemistä. Poikkeuksellisesti kuljettajan A kokemat haitat ns. ykköspuukasoista ensiharvennuksella johtuivat ainakin osittain erosta harvennusvoimakkuudessa. Kaikki kuljettajat eivät testihakkuiden perusteella osanneet arvioida ennakkoileimauksen tuottavuusvaikutusta, mutta he olivat yksimielisiä siitä, että ennakkoileimaus parantaa korjuutyön laatua. Kuljettajan A kokemus ennakkoileimauksen vaikutuksesta työn tuottavuuteen vastasi aikatutkimustuloksia. Ennakkoileimauksen vaikutuksesta työn henkiseen kuormittavuuteen ei saatu selvyyttä. Kuljettajat C ja D kokivat ennakkoileimauksen hyödyksi puuvalintaan liittyvän päätöksenteon poistumisen, mutta he eivät olleet yksimielisiä siitä, parantaako ennakkoileimaus työssä jakamista.



Kuljettajat eivät kokeneet erittäin merkittävää tarvetta puuvalinnan opastukseen, joka selittynee kuljettajien pitkällä työkokemuksella. Puuvalinta voi olla kokeneille kuljettajille ruttiinomaista ja osittain tiedostamatonta toimintaa. Myös Ylimäen ym. (2012) mukaan kuljettajat kokivat poistettavan puun valinnan opastukselle vähäisen tarpeen verrattuna muihin hakkuutyön osa-alueisiin. Toisaalta Kauppisen ym. (2016) mukaan 58,3 % kuljettajista kokee, että poistettavien puiden ennakkotiedolle on vähintään kohtalainen tarve. Puuvalinnassa kuljettajat huomioivat rungon yläosan ja latvuksen laadun. Tätä tukee Väättäisen ym. (2004) havainto siitä, että puiden latvus- ja runkotason havainnointiin kuluu 10 % tehotyöajasta. Kolme kuljettajaa pitivät puun ylemmistä osista saatavaa lisätietoa siten myös hyödyllisenä. Kuljettajien mukaan toisella harvennuksella puun laatu on puuvalinnan ratkaiseva tekijä. Ensiharvennuksilla poistettavien puiden valikoimismahdollisuudet ovat laadun perusteella pienet (Stödt ym. 2003), minkä takia harvennusperiaate (latvuseros) saattaa ohjata puuvalintaa puun laatua enemmän. Kuljettaja B ei käyttäisi puuvalintaa opastavaa järjestelmää lainkaan. Tätä saattaa selittää se, että kuljettaja B koki hakkuutyön luovana toimintana. Sen sijaan kuljettaja D koki hakkuutyön täysin mekaanisena suorittamisena, jota puuvalintaa opastava järjestelmä voisi helpottaa. Kuljettajat A ja C käyttäisivät puuvalintaa opastavaa järjestelmää työn tukena, jos järjestelmä takaisi paremman korjuujäljen. Kuljettajan A suhtautumista tukevat sekä kuljettajan palaute että aikatutkimustulokset. Oletettavasti kuljettajan C vastausta selittää tottumus nykyisenkaltaiseen työntekoon 28 työvuoden aikana.

Kuljettajat eivät kokeneet vaikeuksia ylläpitää sopivaa harvennusvoimakkuutta. Kuljettajien C ja D mukaan harvennusvoimakkuuteen vaikutti merkittävästi lähtöpuuston epätasainen tilajärjestys. Arvio jäävästä puustosta voi perustua pelkästään visuaaliseen hahmotuskykyyn (Gellerstedt 2002). Erityisesti tilajärjestykseltään epätasaisessa puustossa kuljettaja saattaa perustaa harvennusvoimakkuuden esimerkiksi nyrkkisääntöön ”latvat erilleen” (puun latvalle varmistetaan kasvutila joka suuntaan) ennemmin kuin jäävän puuston tarkkaan määrään. Joka tapauksessa, kaikki kuljettajat olivat halukkaita käyttämään harvennusvoimakkuuden seurantaan tarkoitettua sovellusta, joka toimisi työn tukena. Myös Kauppisen ym. (2016) mukaan jopa 75 % kuljettajista ilmoitti karttapohjaisen esityksen harvennustarpeesta/-voimakkuudesta eri osissa leimikkoa olevan vähintään kohtalaisen tarpeellinen.

## 7.5 Puuvalintaa opastavan järjestelmän kannattavuus

Puuvalintaa opastavan järjestelmän taloudellista kannattavuutta arvioitiin ennakkoleimauksen ajanmenekkivaikutuksen perusteella. Työn tuottavuus on vain yksi taloudellisesti merkityksellinen tekijä harvennushakkuussa. Korjuuyrittäjien, metsäteollisuuden ja metsänomistajien hakkuutyölle asettamat odotukset käsittelevät myös muita tekijöitä kuin työn tuottavuutta (Asikainen ym. 2009). Investointilaskelmissa ei huomioitu hakkuutyön laadun tai kuljettajan työhyvinvoinnin ja työssä jaksamisen parantamisen taloudellisia vaikutuksia. Hakkuukoneenkuljettajien koulutus on kallista (Ylimäki ym. 2012) ja puuvalintaa opastavan järjestelmän ansioista voitaisiin saavuttaa myös epäsuoria kustannussäästöjä koulutuksessa tai laadunvalvonnassa. Puuvalintaa opastavan järjestelmän avulla aloitteleva kuljettaja saattaisi saavuttaa nopeammin ammattikuljettajan tason (kts. Purfürstin 2010 oppimisaikakäyrät). Edellisten tekijöiden taloudellista merkitystä on kuitenkin vaikea määritellä.

Järjestelmän kannattavuutta tutkittiin nettonykyarvolaskelmilla. Muuttuvien kustannusten suuruus ja harvennushakkuutyön osuus hakkuukoneen kokonaiskäyttötunneista vaikuttivat enemmän puuvalintaa opastavan järjestelmän kannattavuuteen kuin laskentakorkokanta tai vuosimenojen vastaavansuuruinen suhteellinen muutos. Herkkyysanalyysiä oltaisiin voitu tehdä myös kuljettajittain ja eri hakkuukoneen käyttöasteilla. Laskelmilla saatiin kuitenkin hyvä käsitys siitä, missä suuruusluokassa järjestelmän maksimihankintahinta voi vaihdella. Puuvalintaa opastavan järjestelmän maksimihankintahinta oli se hinta, jolla investoinnin nettonykyarvo on 0. Toisaalta teknologian edelläkävijät voivat olla halukkaita maksamaan tuotteen teknisistä erityisominaisuuksista (TIEKE ry 2005), jolloin investoinnin tekemiseen voidaan päätyä myös negatiivisella nettonykyarvolla.

Teoreettisella hintakehitysmallilla konkretisoitiin uuden teknologian kannattavuuskehitystä. Teknologian hankintahinnasta markkinoille saapuessa voidaan esittää vain arvioita. Puuvalintaa opastava järjestelmä edellyttää mittausteknologian, erillisen tietokoneen ja laajamittaista ohjelmistokehitystä. Ohjelmistotuotteiden osalta ensimmäisen tuotteen tuotekehityskustannukset ovat erittäin suuret verrattuna seuraavien tuotteiden valmistukseen (TIEKE ry 2005). Tästä syystä oletus valmistuskustannusten nopeasta laskusta on perusteltu. Esimerkiksi autoteollisuudessa sensorien käyttö lisääntyy ja laserkeilaintekniikka muuttuu nopeasti (Hyyppä ym. 2016), joten myös laitteiston hankintahinnan lasku on oletettavaa. On selvää,

että jossakin vaiheessa uuden tuotteen hankintahintakehitys hidastuu ja hintataso vakiintuu. Kustannusten muutosnopeutta ei voida kuitenkaan tarkasti tietää.

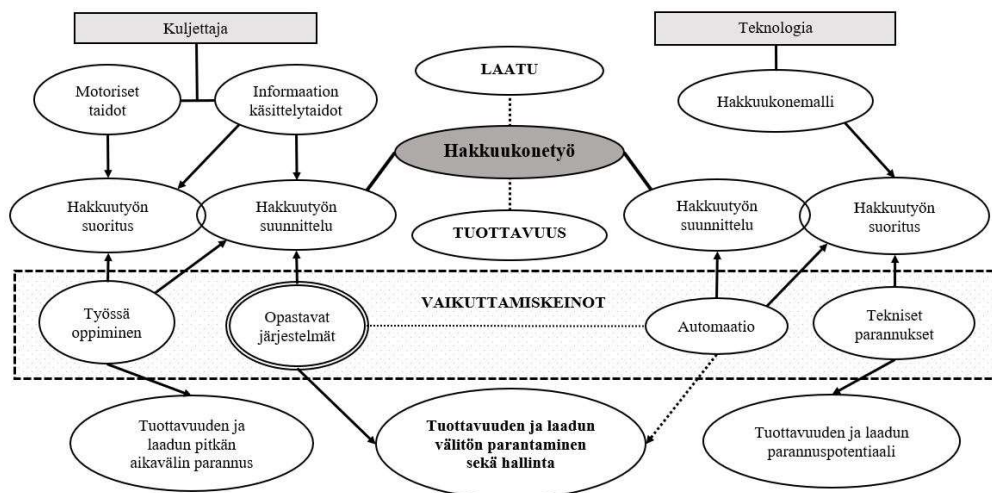
Puuvalintaa opastavan järjestelmän lopullisen hinnan määrittelee tuotteen tarjoaja eli hakkuukonevalmistaja. Markkinoiden koko saattaa rajoittaa uuden teknologian markkinapotentiaalia metsäkonevalmistajan näkökulmasta. Globaalissa mittakaavassa metsäkoneita valmistetaan vuosittain tuhansia kappaleita (Asikainen ym. 2009), mutta yksittäisen suomalaisen metsäkonevalmistajan valmistamien harvennushakkuukoneiden osuus on tästä vain murto-osa. Metsäkonevalmistajat eivät ole halukkaita tekemään pitkälle tulevaisuuteen tähtäävää kehitystyötä ilman julkista rahoituspanosta, koska tuloksen muuttuminen kannattavaksi liiketoiminnaksi kestää liian kauan (Asikainen ym. 2009). Ilman kehittämistukea tuotteen hinta muodostuisi liian kalliiksi puunkorjuuyrityksen näkökulmasta.

## **8 JOHTOPÄÄTÖKSET**

Työn tavoite oli tutkia poistettavien puiden etukäteisvalinnan vaikutusta hakkuun tuottavuuteen ja laatuun koneellisessa harvennushakkuussa. Tutkimuksessa hyödynnettiin perinteistä ennakkoleimausta, jonka vaikutuksia kuljettajan työntekoon ja sen tehokkuuteen sekä laatuun tutkittiin. Lisäksi kartoitettiin käytännön edellytyksiä ja taloudellisia mahdollisuuksia ottaa tulevaisuudessa käyttöön uuteen sensoriteknologiaan perustuvia älykkäitä järjestelmiä.

Hakkuukoneteknologian kehityssuunta on kohti älykkäiden järjestelmien käyttöönottoa. Käynnissä oleva digitalisaatio luo mahdollisuuksia uusien innovaatioiden kehittämiseksi ja testaamiseksi. Metsäteknologisen kehitystyön pitkän aikajänteen tavoite on kuljettajan korvaaminen hakkuutyössä. Ennen kuin autonomisia hakkuukoneita on mahdollista ottaa käyttöön, semiautomatisoitujen ratkaisujen odotetaan yleistyvän. Erilaiset sensoriteknologiat mahdollistavat hakkuutyön automaatioasteen nostamisen. Sensoridatan monipuolinen hyödyntäminen edellyttää metsäkoneiden tietojärjestelmien standardointityötä. Merkittävä uusien innovaatioiden käyttöönoton haaste on sensorijärjestelmien luotettavuus metsäolosuhteissa. Sää- ja vuodenaikojen vaihtelu sekä metsäkonetyön ankara työympäristö asettavat sensorien ominaisuuksille erityisvaatimuksia.

Viime vuosina hakkuutyön tuottavuuden nostaminen on tullut yhä vaikeammaksi. Hakkuukoneenkuljettaja on tuottavan ja laadukkaan harvennushakkuutyön avaintekijä. Harvennushakkuun näkyvä tulos syntyy oikean puuvalinnan, sopivan harvennusvoimakkuuden, ajourasuunnittelun ja hakkuukoneen tarkan käsittelyn yhteisvaikutuksesta. Kuljettajan motoriset ja psyykkiset valmiudet sekä hetkellinen kuormitustaso ja vireystila vaikuttavat hakkuutyön suunnitteluun ja suoritukseen. Työkokemuksen myötä kehittyneet toimintaa ohjaavat sisäiset mallit helpottavat kuljettajaa muodostamaan kokonaiskuvan hakkuutyön toteutuksesta. Kuljettajan suorituskyvyn kasvattamiseksi kuljettajalle pitäisi tarjota enemmän työtä tukevaa informaatiota. Kuljettajaa opastavat järjestelmät tarjoavat potentiaalisen ratkaisun kuljettajan suorituskyvyn parantamiseen ja työn laadun hallintaan (kuva 36). Samalla työn metsänhoidollista painoa voitaisiin siirtää työn motoriseen suorittamiseen.



**Kuva 36.** Hakkuukonetyön tuottavuus ja laatu muodostuvat teknologian ja kuljettajan yhteisvaikutuksesta. Kuljettajaa opastavien järjestelmien avulla voitaisiin parantaa työn tuottavuuden ja laadun tasoa sekä hallittavuutta.

Ennakkoleimaus soveltuu menetelmällisesti digitaaliseen puuvalintaa opastavaan järjestelmään. Ennakkoleimauksella voidaan lyhentää hakkuulaitteen vientiin ja siirtymiin kuluva aikaa. Edellä mainitut työvaiheet muodostavat alle puolet hakkuun tehoajanmenekistä ja pääosa työvaiheiden ajanmenekistä kuluu mekaaniseen suorittamiseen. Tästä syystä ennakkoleimauksella ei voida saavuttaa merkittävää tuottavuusharppausta. Sen sijaan korjuutyön laatuun ennakkoleimauksella voi olla merkittävä vaikutus. Ennakkoleimauksella harvennusvoimakkuus voidaan määrittää tarkasti. Lisäksi ennakkoleimauksen avulla voidaan varmistaa

metsänhoidollisesti poistettavien puiden tunnistaminen. Puuvalinnan opastus on potentiaalisinta männyllä, koska erityisesti männiköissä tulisi välttää liian voimakkaita harvennuksia ja runkojen laatu vaihtelee paljon.

Ammattikuljettajat eivät välttämättä koe merkittävää tarvetta puuvalinnan opastukseen, mutta he hyötyisivät vaikeasti tunnistettavien puun laatuviikojen ja sairauksien ennakkotiedosta. Opastus saattaa olla tarpeellista haastavissa olosuhteissa, kuten talvella lumen hankaloittaessa hakkuutyötä. Harvennusvoimakkuuden seurantaan tarkoitetut sovellukset antaisivat varmuutta ammattikuljettajien työn tekoon. Ennakkoleimauksen vaikutus kuljettajan työssä jaksamiseen voisi tulla esille vasta työvuoron loppua kohti, kun kuljettajan viireystila on laskenut. On huomattava, että myös ennakkoleimatussa harvennuksessa kuljettaja joutuu tekemään kasojen paikkoihin ja hakkuujärjestykseen liittyvää suunnittelua. Työn suunnittelua vaaditaan erityisesti silloin kun poistettavia puita on puomin ulottuman äärirajoilla. Kuljettajan on tehtävä päätöksiä siitä, mistä työpisteestä rungot valmistetaan, tai kannattaako rungon haltuunottamiseksi tehdä pisto.

Puuvalintaa opastavan järjestelmän kehittäminen on mahdollista, mikäli puiden tunnistus ja laadun mittaaminen voidaan automatisoida. Sensoriteknologiaa koskevat tutkimustulokset ovat lupaavia. Koneenäkö soveltuu hyvin kuvatulkintaoperaatioihin ja laserkeilaus puolestaan kolmiulotteiseen mallintamiseen. Puuvalintaa opastava järjestelmä voisi perustua mobiililaserkeilauksella tuotettuun metsikön todellista rakennetta kuvaavaan puukarttaan. Laserkeilausdataa voitaisiin täydentää konenäön avulla puulajista ja puuston laadusta sekä terveydestä. Mobiilikartoitusmenetelmien haaste on niiden vaihteleva tarkkuus. Mahdollisuudet tunnistaa poistettavia puita mittalaitteiden tuottaman tiedon avulla rajautuu koskemaan ainakin aluksi alikasvoksesta vapaita männiköitä ja koivikoita. Ensiharvennuksella lähtöpuuston suuri tiheys vaikeuttaa yksittäisten runkojen tunnistamista. Hakkuukoneesta käsin ei voida tuottaa tietoa puun kuljettajalle näkymättömissä olevilta puolilta. Tästä syystä vaihtoehtoisia mahdollisuuksia hyödyntää esimerkiksi tiedustelurobottia tai drooni-lennokkia poistettavien puiden kartoituksessa ei pidä poissulkea.

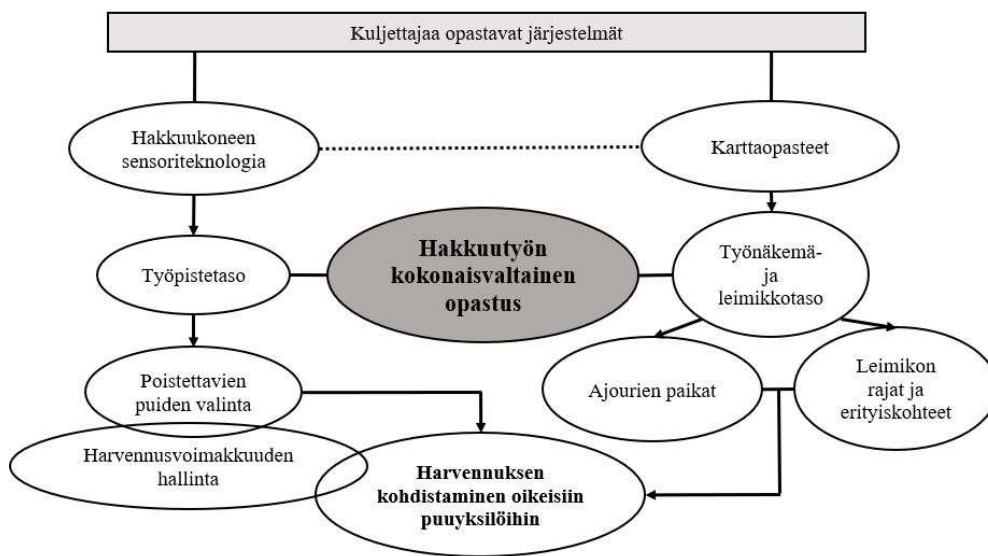
Puuvalintaa opastavan järjestelmän kehittämisessä harvennushakkuutyö tulee hahmottaa kokonaisuutena. Puuvalintaa opastavassa järjestelmässä tarvitaan lähtötietoja halutuista lopputuotteista, metsänhoitosuosituksista ja metsikön kasvukyvystä. Harvennusta koskevat ohjeet

saattavat muuttua ajassa ja olla leimikkokohtaisia. Harvennusvoimakkuutta tulee tarkastella sekä korjuun kannattavuuden että metsän tuottokyvyn näkökulmasta. On tärkeä selvittää, miten sopiva harvennusvoimakkuus määritetään ja miten harvennusmallien soveltaminen voidaan huomioida. Harvennushakkuutyön monimutkaisuus edellyttää tekoälyn hyödyntämistä. Poistettavien puiden valintaan tulee kehittää päätöksentekomalli, joka huomioi puustoa, työmenetelmää ja hakkuukonetta koskevat tekijät. Yksittäisten puiden dimensio- ja laatutunnusten lisäksi korjuukaluston liikkuvuusrajoitteet (koneen koko ja puomin ulottuvuus) sekä harvennustyölle asetetut kriteerit (esim. puulajivalinta) on huomioitava. Puuvalintaa opastava järjestelmä edellyttää myös käyttöliittymän, jolla hakkuuehdotus visualisoidaan kuljettajalle. Esitetyn tiedon tulisi olla helposti tulkittavissa, sillä hakkuutyössä työtahti, päätöksenteon määrä ja havainnointi on hyvin nopeaa ja runsasta.

Poistettavien puiden valinnassa tulee huomioida puuston järeys ja laatu sekä korjuutekniset näkökulmat. Harvennusta koskevat lukuisat ja osittain ristiriitaiset kriteerit (esim. luonnon monimuotoisuus / puuntuotos) sekä laatutekijöiden epätarkat luokitukset muodostavat poistettavien puiden valinnasta monimutkaisen kokonaisuuden. Poistettavan puun määrittäminen edellyttää läpimittojen mittaamista rungon eri korkeuksilta. Läpimittojen avulla voidaan mallintaa puun runkomuoto ja pituus. Erityisesti toisella harvennuksella puun laadun mittaus korostuu. Jos lähtöpuusto on tasalaatuinen, poistettavaksi tulee valita helposti haltuunotettavia puita. Hakkuulaitteen viennin ajanmenekkiä tulee minimoida ja välttää puomin turhia liikkeitä. Haastavia tilanteita syntyy, kun ajouraväli poikkeaa normaalista työleveydestä. Kun ajouraväli on pieni, puita ei tule enakkoleimata puomin ulottuman äärilaidoilta. Suurilla ajouraväleillä riski on harventamattoman alueen syntyminen. Mikäli puuvalintaa opastavan järjestelmän hakkuuehdotus ei ole täydellinen, voidaan enakkoleimauksen hyödyt menettää. Oleellinen osa puuvalintaprosessia on määrittää, miten harvennusvoimakkuus mitataan. Työnäkymä voidaan jakaa symmetrisiin koealoihin, joiden sisällä kasvatettavan puuston määrä lasketaan. Vaihtoehtoinen lähestymistapa on laskea yksittäisen puun ympärille puun läpimittaa vastaava tarvittava kasvutila. Tällöin puiden spatiaalisuus vaikuttaa puuvalintaan erityisesti tilajärjestykseltään ryhmittäisessä puustossa.

Työpistetason tietoa poistettavista puista tulisi pystyä täydentämään hakkuualueen rajaukseen liittyvillä tiedoilla. Ensiharvennuksella on oltava ajourasuunnitelma, jonka perusteella

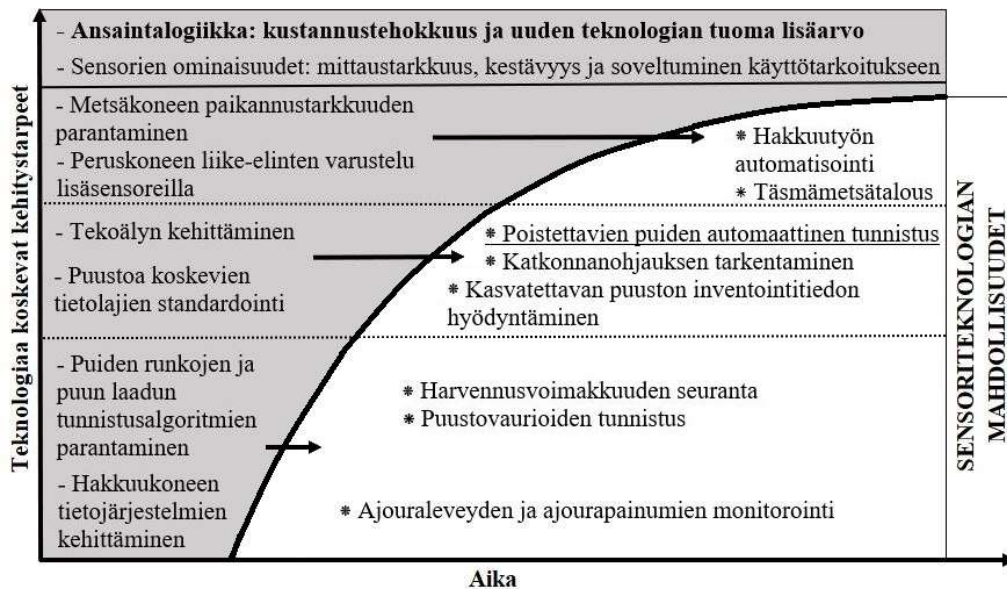
poistettavien puiden valinta on mahdollista tehdä huomioiden hakkuun etenemisen suunta. Sensorien tulisi pystyä tunnistamaan esteitä, jotka vaikuttavat ajouran tarkempaan sijoittamiseen. Ajouran sijoitus vaikuttaa paitsi ajouranvarsipuiden myös niitä ympäröivien puiden valintapäätöksiin. Täydellisen päätöksentekojärjestelmärakenteen luominen edellyttäisi eri tietolähteiden yhdistämistä ja analysointia (kuva 37). Skenaarioon suhtautuminen vaatii optimistista ja innovatiivista asennetta. Yksinkertaiset ja suuntaa-antavat ratkaisut lienevätkin lähempänä käytännön toteutusmahdollisuuksia.



**Kuva 37.** Puuvalintaa opastavan järjestelmän ideaalikonsepti.

Ennakkoleimatussa harvennuksessa hakkuutyön tehostumista vastaava kustannussäästö ei todennäköisesti riitä kattamaan puuvalintaa opastavaan järjestelmän käyttökustannuksia. Mikäli ennakkoleimauksen vaikutukset kuljettajan informaatio-ergonomiaan ja korjuujälkeen otetaan huomioon, niin puuvalintaa opastavan järjestelmän kannattavuus paranee. Sensoriteknologian yleinen kehittyminen avaa mahdollisuuksia sensorien monipuoliselle hyödyntämiselle metsäsovelluksissa. Tämä vauhdittaa kehitystyötä ja parantaa sensorijärjestelmien kustannustehokkuutta. Uusien sensorijärjestelmien käyttöönottoa voivat rajoittaa koettujen hyötyjen (ansaintalogiikan) puute ja sensorien ominaisuudet, vaikka muut toiminnan edellytykset täyttyisivät (kuva 38). Uuden sensoriteknologian mahdollisuudet pitää nähdä metsien

kestävän käytön ja operaatioiden paremman hallittavuuden kautta. Kehitystyö edellyttää yhteistyötä tiedeyhteisön ja metsäkonevalmistajien välillä. Metsäkonevalmistajia on rohkaittava ja tuettava eri keinoin, jotta konkreettisia edistysaskelia voidaan saavuttaa.



**Kuva 38.** Uuden sensoriteknologian mahdollisuuksien toteuttaminen edellyttää kehitystyötä.

Tärkeä ylätasoinen jatkotutkimusalue on puunkorjuuoperaatioiden tehokkaampi hallinta. Kuljettajatutkimuksessa on tärkeä kartoittaa keinoja, joilla kuljettajien välisiä tuottavuuseroja voidaan pienentää. Ennakkoleimauksen vaikutusta harvennushakkuutyön tuottavuuteen tai laatuun ei ole tutkittu riittävän kattavasti. Jatkotutkimusta ennakkoleimauksen hyötypotentiaalista tarvitaan erityisesti kokemattomien kuljettajien osalta. Simulaattoritutkimus mahdollistaisi toistettavan koejärjestelyn, jossa ammattikuljettajien sekä aloittelevien kuljettajien pareittainen vertailu olisi mahdollista toimittaessa samankaltaisessa ympäristössä. Kuljettajien kokemasta puuvalinnan ja harvennusvoimakkuuden opastuksen tarpeesta on tehtävä kattavampi haastattelututkimus. Monipuolinen tutkimus liittyen poistettavien puiden valintaan on ensiarvoisen tärkeää, mikäli harvennushakkuutyö halutaan tulevaisuudessa automatisoida.



## LÄHTEET

- Asikainen, A., Ala-Fossi, A., Visala, A. & Pulkkinen, P. 2005. Metsäteknologiasektorin visio ja tiekartta vuoteen 2020. Metlan työraportteja 8. 91 s. ISBN: 951-40-1960-1.
- Asikainen, A., Leskinen, L., Pasanen, K., Väättäinen, L., Anttila, P. & Tahvanainen, T. 2009. Metsäkonesektorin nykytila ja tulevaisuus. Metlan työraportteja 125. 48 s. ISBN: 978-951-40-2168-8.
- Bergström D., Bergsten U., Nordfjell T. & Lundmark T. 2007. Simulation of geometric thinning systems and their time requirements for young forests. *Silva Fennica* 41(1): 137–147.
- Billingsley, J., Visala, A. & Dunn, M. 2008. Robotics in agriculture and forestry. In: B. Siciliano & O. Khatib (eds.) *Springer handbook of robotics*. Springer-Verlag, Berlin, Germany. s. 1065–1077.
- Björheden, R. 1991. Basic time concepts for international comparisons of time study reports. *Journal of Forest Engineering* 2(2): 33–39.
- Cameron, A.D. 2002. Importance of early selective thinning in the development of long-term stand stability and improved log quality: a review. Department of Forestry, Scotland. *Forestry* 75 (1): 25–35.
- Elfving, B. 2009. Natural mortality in thinning and fertilisation experiments with pine and spruce in Sweden. *Forest Ecology and Management* 260: 353–360.
- Eriksson, M. & Lindroos, O. 2014. Productivity of harvesters and forwarders in CTL operations in northern Sweden based on large follow-up datasets. *International Journal of Forest Engineering* 25(3): 179–200.
- Gellerstedt, S. 2002. Operation of the single-grip harvester: motor-sensory and cognitive work. *International Journal of Forest Engineering* 13(2): 35–47.
- Gellerstedt, S. & Dahlin, B. 1999. Cut-To-Length: The Next Decade. *International Journal of Forest Engineering* 10 (2): 17–24.
- Grimm, S. 2015. Implementing Complex Partial Harvests in Central Maine: Is Tree Marking Necessary? Electronic Theses and Dissertations. The University of Maine. Saatavissa: <https://digitalcommons.library.umaine.edu/etd/2336/>.
- Heinimann H.R. 2007. Forest operations engineering and management – the ways behind and ahead of a scientific discipline. *Croatian Journal of Forest Engineering* 28: 107–121.
- Hellström, T., Lärkeryd, P., Nordfjell, T. & Ringdahl, O. 2009. Autonomous Forest Vehicles: Historic, envisioned, and state-of-the-art. *International Journal of Forest Engineering* 20(1): 31–38.
- Hokka, T. & Räsänen, T. 2000. Menetelmä jäävän puuston arviointiin harvennushakkuissa sekä laitteistoasetusten vaikutus hakkuukoneen GPS-paikantimen tarkkuuteen. Metsätehon raportti 86. Saatavissa: <http://www.metsateho.fi/menetelma-jaavan-puuston-arviointiin-harvennushakkuissa-seka-laitteistoasetusten-vaikutus-hakkuukoneen-gps-paikantimen-tarkkuuteen/>.
- Holopainen, M. & Hyypä, J. 2009. Kohden lasermittauksiin perustuvaa täsmämetsätaloutta. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2009: 357–360.
- Holopainen, M., Hyypä, J. & Vastaranta, M. 2013. Laserkeilaus metsävarojen hallinnassa. Helsingin yliopiston metsätieteiden laitoksen julkaisuja 5. 75 s.
- Hong, S., Ansari, A., Saavedra, G. & Martinez-Corral, M. 2018. Full-parallax 3D display from stereo-hybrid 3D camera system. *Optics and Lasers in Engineering* 103: 46–54.

- Hynynen, J. & Arola, M. 1999. Ensiharvennusajankohdan vaikutus hoidetun männikön kehitykseen ja harvennuksen kannattavuuteen. *Metsätieteen aikakauskirja* 1/1999: 5–23.
- Hynynen, J. & Huuskonen, S. 2014. Harvennushakkuut. Julkaisussa: Rantala, S. (toim.). *Metsäkoulu*. 8 PAINOS. Metsäkustannus Oy. s. 133–154.
- Hynynen, J. & Saramäki, J. 1995. Ensiharvennuksen viivästymisen ja harvennusvoimakkuuden vaikutus nuoren männikön kehitykseen. *Metsätieteen aikakauskirja* 2/1995: 99–113.
- Hyypä, J., Hyypä, H., Jaakkola, A., Matikainen, L., Ahlavo M. & Virtanen J.-P. 2016. Autonomiset ajoneuvot ja laserkeilaus. *Maankäyttö* 4/2016. s. 15–17.
- Hyyti, H. & Visala, A. 2013. Feature Based Modeling and Mapping of Tree Trunks and Natural Terrain Using 3D Laser Scanner Measurement System. 8<sup>th</sup> IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles, Australia, 2013. *Intelligent Autonomous Vehicles* 8(1): 248–255. DOI: 10.3182/20130626-3-AU-2035.00065.
- Hämäläinen, J. & Ovaskainen, H. 2018. Omavalvonta osana puuhuollon digitalisaatiota. Kohti automaattista puunkorjuun laadunhallintaa. Metsäteho Oy. Julkaisematon kalvosarja. [Viitattu: 10.6.2018].
- Iittiläinen, P., Hyppölä, A., Kariniemi, A., Nieminen, T., Poikela, A., Ranta, R., Roininen, K., Rumpunen, H., Tolonen, H. & Äijälä, O. 2003. Korjuujälki harvennushakkuussa -opas. Metsäteho Oy. KäpyläPrint Oy. Helsinki. Saatavissa: <http://www.metsateho.fi/korjuujalki-harvennushakkuussa/>.
- Isomäki, A. & Väisänen, J. 1980. Harvennustavan vaikutus kasvatettavaan puustoon ja harvennuskertymään. Abstract: Thinning method and its influence on the remaining growing stock and on the thinning yield. *Folia Forestalia* 450: 1–14.
- John Deere Oy 2019. Timbermatic-kartat. John Deere Forestry kotisivut. Saatavissa: <https://www.deere.fi/fi/mets%C3%A4koneet/timbermatic-kartat-timbermanager/>. [Viitattu: 27.2.2019].
- Juurinen, A. 2018. Trestima -metsänmittausjärjestelmän mittaustarkkuus ensiharvennetuissa metsissä. Itä-Suomen yliopisto. Julkaisematon kalvosarja. [Viitattu: 21.5.2018].
- Kaber, D. & Endsley, M. 2004. The effects of level of automation and adaptive automation on human performance, situation awareness and workload in a dynamic control task. *Theoretical Issues in Ergonomics Science* 5(41): 113–153.
- Kantola, A. & Pennanen, O. 1999. Metsänhoidollisen ympäristön vaikutus mäntysahapuun laatuun. Metsätehon raportti 69. Saatavissa: <http://www.metsateho.fi/metsanhoidollisen-ympariston-vaikutus-mantysahapuun-laatuun/>.
- Kariniemi, A. 2006. Kuljettajakeskeinen hakkuukonetyön malli - työn suorituksen kognitiivinen tarkastelu. Väitöskirja. Metsävarojen käytön laitoksen julkaisuja 38. 92+35 s.
- Kariniemi, A. & Vartianmäki, T. 2010. Hakkuukoneen tietojärjestelmä tutkimustiedon lähteenä. Metsätehon raportti 212. Saatavissa: <http://www.metsateho.fi/hakkuukoneen-tietojarjestelma-tutkimustiedon-lahteenä/>.
- Kariniemi, A., Oijala, T. & Rajamäki, J. 1996. Koneellisen harvennushakkuun työnjälki. Koneellisen harvennushakkuun tuottavuus -projektin osaraportti. Metsätehon raportti 12. Saatavissa: <http://www.metsateho.fi/koneellisen-harvennushakkuun-tyonjalki/>.
- Kauppinen, J., Väättäin, K., Tauriainen, S., Einola, K., Malinen J. & Sirén, M. 2016. Monilähdetietoa hyödyntävien karttaopasteiden tarve puunkorjuussa. Haastattelututkimus hakkuukoneenkuljettajille. Luonnonvarakeskus. ISBN: 978-952-326-196-9.
- Kellogg L.D. & Bettinger P. 1994. Thinning productivity and cost for mechanized cut-to-length system in the Northwest pacific coast region of the USA. *Journal of Forest Engineering* 5(2): 43–54.

- Keski-Suomen metsäkeskus 1999. Puutavaralajien mitta- ja laatuvaatimukset. Menestystä metsästä -projekti. Koonnut Rautiainen, K. & Lehtosaari, A. Keski-Suomen metsäkeskuksen julkaisu 7/99. Jyväskylä. Saatavissa: [http://www.virtuaali.info/opetusmaatilat/13/file/puutavaranLaatuvaatimukset\\_1999\\_www.pdf](http://www.virtuaali.info/opetusmaatilat/13/file/puutavaranLaatuvaatimukset_1999_www.pdf).
- Kuitto, P. & Mäkelä M. 1988. Kuormainharvesteri ensimmäisessä ja toisessa harvennuksessa. Metsätehon katsaus 7/1988. Saatavissa: <http://www.metsateho.fi/kuormainharvesteri-ensimmaisessa-ja-toisessa-harvennuksessa/>.
- Kuitto, P., Keskinen, S., Lindroos, J., Oijala, T., Rajamäki, J., Räsänen, T. & Terävä, J. 1994. Puutavaran koneellinen hakkuu ja metsäkuljetus. Metsätehon raportti 410. Saatavissa: <http://www.metsateho.fi/puutavaran-koneellinen-hakkuu-ja-metsakuljetus/>.
- Kärhä, K., Rönkkö, E. & Gumse S.-I. 2004. Productivity and cutting costs of thinning harvesters. International Journal of Forest Engineering 15(2): 43–56.
- Kärhä, K., Änäkälä, J., Hakonen, O., Palander, T., Sorsa, J., Räsänen, T. & Moilanen, T. 2017. Analyzing the Antecedents and Consequences of Manual Log Bucking in Mechanized Wood Harvesting. Mechanics, Materials Science & Engineering 12: 1–15. DOI: 10.2412/mmse.45.20.957.
- Kärkkäinen, M. & Uusvaara, O. 1982. Nuorten mäntyjen laatuun vaikuttavia tekijöitä. Abstract: Factors affecting the quality of young pines. Metsäntutkimuslaitos. Folia Forestalia 515. 28 s.
- Lageson, H. 1997. Effects of thinning type on the harvester productivity and on the residual stand. Journal of Forest Engineering 8(2): 7–14.
- Ligné D., Eliasson L. & Nordfjell T. 2005. Time consumption and damage to the remaining stock in mechanized and motor manual pre-commercial thinning. Silva Fennica 39(3): 455–464.
- Lilleberg, R. 1995. Harvennustapa männikön ensiharvennuksessa. Metsätehon katsaus 3/1995. Saatavissa: <http://www.metsateho.fi/harvennustapa-mannikon-ensiharvennuksessa/>.
- Lindroos, O., Häggström, C. & La Hera, P.X.M., 2017. Drivers of Advances in Mechanized Timber Harvesting – a Selective Review of Technological Innovation. Croatian Journal of Forest Engineering 38 (2): 243–258.
- Loponen, H. 2018. Puu poikki ja robotin kyytiin – Suomalaisinsinööri kuljettaisi puut metsästä tien varteen kuljetusrobottien avulla. Tekniikka & Talous 31.8.2018. s. 18–20.
- Luonnonvarakeskus 2018. Metsätuho-opas. Tuhonaiheuttajaluettelo. MetINFO – Metsien terveys. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <http://www.metla.fi/metinfo/metsienterveys/opas/tuhonaiheuttajaluettelo.htm>. [Viitattu: 26.5.3018].
- Lähteenmäki, P. 2018. Ponsse päästi hakkerit harvesteriin. Digitalisaatio. Talouselämä 24/2018. s. 38–43.
- Melander, L. 2018. Urapainumien mittaustekniikat. Tampereen teknillinen yliopisto. Julkaisematon kalvosarja. [Viitattu: 10.6.2018].
- Malinen, J., Taskinen, J. & Tolppa, T. 2018. Productivity of Cut-to-Length Harvesting by Operators’ Age and Experience. Croatian Journal of Forest Engineering 39(1): 15–21.
- Melkas, T. & Hämäläinen, J. 2015. Hakkuukoneella kerätyn puustotiedon hyödyntäminen. Menetelmäkuvaus kaukokartoituksen referenssitiedon keräämiseen ja metsävaratietojen päivitykseen. Metsätehon raportti 237. Saatavissa: <http://www.metsateho.fi/hakkuukoneella-keratyn-puustotiedon-hyodyntaminen/>.
- Melkas, T., Miettinen, M., Hämäläinen, J. & Einola, K. 2014. Puukarttajärjestelmä hakkuun tehostamisessa. Metsätehon raportti 230. Saatavissa: <http://www.metsateho.fi/puukarttajarjestelma-hakkuun-tehostamisessa/>.

- Melkas, T., Riekkilä, K. & Sorsa, J.A. 2018. Automaattinen toimenpidekuvion rajojen muodostus hakkuukoneen sijaintitietoon perustuen. Metsätehon tuloskalvosarja 7a/2018. Saatavissa: <http://www.metsateho.fi/automaattinen-toimenpidekuvion-rajojen-muodostus-hakkuukoneen-sijaintitietoon-perustuen/>.
- Metsäteho Oy 1982. Puunkorjuu nuorista kasvatusempeistä. Metsätehon opas. Saatavissa: <http://www.metsateho.fi/puunkorjuu-nuorista-kasvatusempeista/>.
- Metsäteho Oy 2006. Kasvatettavan puuston määritys koneellisessa harvennuksessa Etelä-Suomi. Metsätehon koulutusmateriaali. Saatavissa: <http://www.metsateho.fi/kasvatettavan-puuston-maaritys-koneellisessa-harvennuksessa-etela-suomi/>.
- Metsäteho Oy 2015. Tehokas puuhuolto 2025 -visio. Saatavissa: <http://www.metsateho.fi/tehokas-puuhuolto-2025-visio/>.
- Moilanen, T. 2018. Ponsse Oyj. Korjuuvaurioiden syntyminen harvennushakkuussa. Yksityinen sähköpostiviesti 25.6.2018.
- Murphy, G. 2010. New Sensor Technologies and Analytical Tools for Precision Forest Management. Precision Forestry Symposium, 1–3 March 2010, Stellenbosch, South Africa. Verkkodokumenttia ei ole enää saatavilla.
- Mäkelä, T. 2017. Puunkorjuuresurssien tehokas käyttö - Metsäkoneyritysten toimintaympäristö ja operatiiviset toimintamallit. Maisterin tutkielma. Helsingin yliopisto. Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta. Metsätieteiden laitos. URN:NBN:fi:hulib-201706154902.
- Nicholls, A., L. Bren, & N. Humphreys. 2004. Harvester productivity and operator fatigue: working extended hours. International Journal of Forest Engineering 15(2): 57–65.
- Niemistö, P. 1992. Runkolukuun perustuvat harvennussmallit. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 432. 18 s.
- Nuutinen, Y., Väätäinen, K., Heinonen, J., Asikainen, A. & Röser, D. 2008. The accuracy of manually recorded time study data for harvester operation shown via simulator screen. Silva Fennica 42(1): 63–72.
- Nurminen, T., Korpunen, H. & Uusitalo, J. 2006. Time consumption analysis of the mechanized cut-to-length harvesting system. Silva Fennica 40(2): 335–363.
- Olivera, A., Visser, R., Acuna, M. & Morgenroth, J., 2016. Automatic GNSS-enabled harvester data collection as a tool to evaluate factors affecting harvester productivity in a Eucalyptus spp. harvesting operation in Uruguay. International journal of forest engineering 27(1): 15–28.
- Ovaskainen, H. 2009. Timber harvester operators' working technique in first thinning and the importance of cognitive abilities on work productivity. Doctoral Thesis. Metsätieteiden laitos, Joensuun yliopisto. <https://doi.org/10.14214/df.79>.
- Ovaskainen, H., Uusitalo, J. & Väätäinen, K. 2004. Characteristics and significance of a harvester operators' working technique in thinnings. International Journal of Forest Engineering 15(2): 67–77.
- Palander, T., Eronen, J., Kärhä, K. & Ovaskainen, H. 2018. Development of a wood damage monitoring system for mechanized harvesting. Annals of Forest Research 61(2): 243–258.
- Palonen, T., Hyyti, H. & Visala, A. 2017. Augmented Reality in Forest Machine Cabin. Proceedings of the 20th World Congress of the International Federation of Automatic Control (IFAC 2017) 50(1). 8 s. DOI: 10.1016/j.ifacol.2017.08.1075.
- Pajkoš, M., Klvač, R., Neruda, J. & Mishra, P.K. 2018. Comparative Time Study of Conventional Cut-To-Length and an Integrated Harvesting Method - A Case Study. Forests 9(194). 10 s.

- Parasuraman, R. 2000. Designing automation for human use: empirical studies and quantitative models. *Ergonomics* 43(7): 931–51.
- Pelli, V. 2011. Konenäköjärjestelmä. Konenäköjärjestelmän käyttöönotto oppilaitosympäristössä. Opinnäytetyö. Ylempi ammattikorkeakoulututkinto. Automaatioteknologian koulutusohjelma. Tampereen ammattikorkeakoulu. Saatavissa: [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/37198/Veli\\_Pelli.pdf?sequence=1](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/37198/Veli_Pelli.pdf?sequence=1).
- Pennanen, O. 1978. Pysty- ja jälkimittauksen ajanmenekki. *Metsätehon tiedotus* 347. Saatavissa: <http://www.metsateho.fi/pysty-ja-jalkimittauksen-ajanmenekki/>.
- Penttilä, T., Hökkä, H. & Laiho, R. 2000. Harvennusten ekologiset perusteet ja tuotosvaikutukset ojitetuilla räreillä. *Metsätieteen aikakauskirja* 2000 (2): 292–296.
- Petukhov, I., Tanryverdiev, I. & Luydmila, S. 2015. Automation of selection cutting process using harvester. International Conference on Mechanical Engineering. Automation and Control Systems (MEACS) 2015. Faculty of Radio Engineering. Volga State University of Technology. DOI: 10.1109/MEACS.2015.7414865.
- Piri, T., Selander, A. & Hantula, J. 2017. Juurikäpätuhojen tunnistaminen ja torjunta. Opas. Metsäkeskuksen julkaisu. Saatavissa: <https://www.metsakeskus.fi/julkaisut/juurikaapatuhojen-tunnistaminen-ja-torjunta>.
- Purfürst, F.T. 2010. Learning Curves of Harvester Operators. *Croatian Journal of Forest Engineering*. 31(2): 89–97.
- Purfürst, F. T. & Erler, J. 2011. The human influence on productivity in harvester operations. *International Journal of Forest Engineering* 22(2): 15–22.
- Pyörälä, J., Liang, X., Vastaranta, M., Saarinen, N., Kankare, V., Wang, Y., Holopainen, M. & Hyypä, J. 2018. Quantitative Assessment of Scots Pine (*Pinus Sylvestris L.*) Whorl Structure in a Forest Environment Using Terrestrial Laser Scanning. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 11 (10): 3598–3607.
- Päivänen, J. & Taipale, J. 1981. Hakkuumiehen suorittama puiden valinta ensiharvennuksessa. *Metsätehon tiedotus* 370. Saatavissa: <http://www.metsateho.fi/hakkuumiehen-suorittama-puiden-valinta-ensiharvennuksessa/>.
- Rajamäki, J., Kariniemi, A. & Oijala, T. 1996. Koneellisen harvennushakkuun tuottavuus. *Metsätehon raportti* 8. Saatavissa: <http://www.metsateho.fi/koneellisen-harvennushakkuun-tuottavuus/>.
- Ramos, C.P. 2016. Agreement or Chance How Exact Are Tree Markings in Forest Management? Master thesis. Umeå University. Department of Forest Resource Management. Saatavissa: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:slu:epsilon-s-6245>.
- Rieppo, K. & Kariniemi, A. 2001. Korjuukoneiden kehittämismahdollisuudet korjuujäljen kannalta. *Metsätehon raportti* 118. Saatavissa: <http://www.metsateho.fi/korjuukoneiden-kehittamismahdollisuudet-korjuujaljen-kannalta/>.
- Ringdahl, O., Lindroos, O., Hellström, T., Bergström, D., Athanassiadis, D. & Nordfjell, T. 2011. Path tracking in forest terrain by an autonomous forwarder. *Scandinavian Journal of Forest Research* 26(4): 350–359.
- Rintanen, J. 2018. Tekoäly ei ole uhka ihmiskunnalle. Aalto-yliopisto. Vieraskynä. Helsingin Sanomat (A). s. 5.
- Räsänen, T. 2017. Metsätiedon lähteet ja soveltaminen. EP-Digi. Mitkä ovat digitaalisten tekniikoiden mahdollisuudet metsätaloudessa? Seinäjoki 22.3.2017. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: [https://www.univaasa.fi/fi/sites/ep-digi/ep-digi-ohjelma/tilaisuus\\_5/rasanen/](https://www.univaasa.fi/fi/sites/ep-digi/ep-digi-ohjelma/tilaisuus_5/rasanen/). [Viitattu: 20.6.2018].

- Sarbolandi, H., Lefloch, D. & Kolb, A. 2015. Kinect Range Sensing: Structured-Light versus Time-of-Flight Kinect. Institute for Vision and Graphics. University of Siegen. Germany. Computer Vision and Image Understanding 139: 1–20.
- Self, A.B. & Parker, R.C. 2017. Thinning Pine Trees by the Leave-Tree Method. Mississippi State University. Saatavissa: <https://extension.msstate.edu/sites/default/files/publications/publications/p2832.pdf>.
- Silviculture Handbook 2013. Department of Natural Resources. State of Wisconsin. Saatavissa: <https://dnr.wi.gov/topic/forestmanagement/silviculture.html>.
- Sirén, M. 1998. Hakkuukonetyö, sen korjuujälki ja puustovaurioiden ennustaminen. Väitöskirja. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 649. 179 s.
- Sirén, M. & Aaltio, H. 2003. Productivity and costs of thinning harvesters and harvesterforwarders. International Journal of Forest Engineering 14(1): 39–48.
- Sirén, M. & Tantt, V. 2001. Pienet hakkuukoneet ja korjuri rämemännikön talvikorjuussa. Metsätieteen aikakauskirja 4/2001: 599–614.
- Soini, A. 2018. Konenäkö. Suomen Automaatioseura. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <http://automaatio-seura.planeetta.com/index/tiedostot/Konenako.pdf>. [Viitattu: 20.6.2018].
- Strandström, M. 2018. Puunkorjuu ja kaukokuljetus vuonna 2017. Metsätehon tulosalvosarja 8a/2018. Saatavissa: <http://www.metsateho.fi/puunkorjuu-ja-kaukokuljetus-vuonna-2017/>.
- Stödt, R., Sirén, M., Tantt, V. & Verkasalo, E. 2003. Jäävän puuston ja poistuman tekninen laatu ensiharvenusmänniköissä. Metsätieteen aikakauskirja 4/2003: 439–464.
- FSC-STD-FIN-01-2006 Finland natural forests FIN. FSC standard for Finland V1-1. 12.5.2011 (Approved 21.01.2011 FIN). Forest Stewardship Council. (suom. Suomen FSC-standardi. Kansallinen FSC-standardi. Suomen FSC-yhdistys). 67 s. Saatavissa: <https://fi.fsc.org/fi-fi/asiakirjat>.
- Suomen metsäkeskus 2018. Korjuujäljen tarkastusten tulokset vuodelta 2017. Tarkastustulokset. Korjuujäljen laatu. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.metsakeskus.fi/korjuujaljen-laatu>. [Viitattu: 25.5.2018].
- Suomen metsäkeskus 2019. Korjuukelpoisuuskartta. Suomen metsäkeskuksen kotisivut. Saatavissa: <https://www.metsakeskus.fi/korjuukelpoisuuskartat>. [Viitattu: 24.2.2019].
- Surakka, H. & Sirén, M. 2007. Poimintahakkuiden puunkorjuun nykytietämys ja tutkimustarpeet. Metsätieteen aikakauskirja 4/2007: 373–390.
- Skogforsk 2019. StanForD (Standard for Forest machine Data and Communication, suom. Metsäkoneiden tiedonsiirtostandardi). Skogforskin kotisivut. Saatavissa: <http://www.skogforsk.se/english/projects/stanford/>. [Viitattu: 26.2.2019].
- TIEKE ry 2005. Hinnoittelun ABC - Opas tietotuotteiden ja palveluiden hinnoitteluun. Hinnoittelumallit asiakassuhteissa -hanke. Tietoyhteiskunnan kehittämiskeskus ry. 53 s. Saatavissa: <http://www.kulmat.fi/imaget/tiedostot/Artikkelit/HinnoittelunABC-opas.pdf>.
- Trimble Forestry 2019. WoodForce -järjestelmän kotisivut. Saatavissa: <https://www.woodforce.fi/>. [Viitattu: 24.2.2019].
- Turunen, J. & Ovaskainen, H. 2018. Hiljainen tieto lähikuljetuksen ajourasuunnittelussa. Metsätehon tulosalvosarja 10/2018. Saatavissa: <http://www.metsateho.fi/hiljainen-tieto-lahikuljetuksen-ajourasuunnittelussa/>.
- Tynkkynen, M. 2001. Yksioteharvesterin informaatioergonomian kehittämistarpeet. Lisensiaatintutkimus. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Konetekniikan osasto. 126 s.

- Uusitalo, J. 2010. Introduction to Forest Operations and Technology. JVP Forest Systems Oy. 287 s.
- Uusvaara, O. 1974. Wood quality in plantation-grown Scots pine. Lyhennelmä: Puun laadusta viljelymänniköissä. Metsäntutkimuslaitoksen julkaisuja 80: 1–105.
- Valkonen, S. 2005. Puu ja sen kehitys. Julkaisussa: Hynynen, J. Valkonen & S. Rantala, S. (toim.). Tuottava metsänkasvatus. Metsäkustannus Oy. s. 16–48.
- Vanclay, J.K., 2011: Future harvest: what might forest harvesting entail 25 years hence? *Scandinavian Journal of Forest Research* 26(2): 183–186.
- Vestlund, K. & Hellström, T. 2006. Requirements and system design for a robot performing selective cleaning in young forest stands. *Journal of Terramechanics* 43(4): 505–525.
- Väättäinen, K. Ala-Fossi, A. & Ovaskainen, H. 2004. The importance of the harvester operator's knowledge in CTL-harvesting operations. Simulator-based training of forest machine operators -seminar, Joensuu, Finland. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: [http://matwww.ee.tut.fi/simumedia\\_www/Seminaari/Presentations/Vaatainen\\_presentation.pdf](http://matwww.ee.tut.fi/simumedia_www/Seminaari/Presentations/Vaatainen_presentation.pdf). [Viitattu: 6.6.2018].
- Väättäinen, K., Ovaskainen, H., Ranta, P. & Ala-Fossi, A. 2005. Hakkuukoneen kuljettajan hiljaisen tiedon merkitys hakkuutulokseen työpistetasolla. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 937. 90 s.
- Väättäinen, K., Lamminen, S., Ala-Ilomäki, J., Sirén, M. & Asikainen, A. 2013. Kuljettajaa opastavat järjestelmät koneellisessa puunkorjuussa – kooste hankkeen avaintuloksista. Metlan työraportteja 279. 24 s. ISBM 978-951-40-2453-5.
- Wang D., Liu J.H., Wang, J.L. & Li, T. 2013. A Simple Tree Detector Using Laser and Camera Fusion. *Sensors and Transducers* 152(5): 137–145.
- Wallentin, C. & Nilsson, U. 2013. Storm and snow damage in a Norway spruce thinning experiment in southern Sweden. *International Journal of Forest Research* 87(2): 229–238.
- Westerberg, S. 2014. Semi-Automating Forestry Machines. Motion Planning, System Integration, and Human-Machine Interaction. Doctoral Thesis. Department of Applied Physics and Electronics. Industrial Doctoral School. Umeå University, Sweden. Saatavissa: <http://umu.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A718380&dswid=8234>.
- Yeo, B.J. & M. Stewart 2000. Thinning Pinus radiata plantation by operator selection: 2. Effect on harvesting productivity. *Australian Forestry* 63(4): 220–225.
- Ylimäki, R., Väättäinen, K., Lamminen, S., Sirén, M., Ala-Ilomäki, J., Ovaskainen, H. & Asikainen, A. 2012. Kuljettajaa opastavien järjestelmien tarve ja hyötypotentiaali koneellisessa puunkorjuussa. Metlan työraportteja 224. 70 s. ISBN:978-951-40-2352-1.
- Äijälä, O. & Poikela, A. 2006. Metsätehon raportti 190. Saatavissa: <http://www.metsateho.fi/harvennusvoimakkuus-korjuualjen-osatekijana/>.
- Äijälä, O., Koistinen, A., Sved, J., Vanhatalo, K. & Väisänen, P. (toim.) 2014. Metsänhoidon suositukset. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapion julkaisuja. 181 s.
- Öhman, M., Miettinen, M., Kannas, K., Jutila, J., Visala, A. & Forsman, P. 2007. Tree Measurement and Simultaneous Localization and Mapping System for Forest Harvesters. 6<sup>th</sup> International Conference on Field and Service Robotics - FSR 2007. Chamonix, France. Helsinki University of Technology. 10 s. <https://hal.inria.fr/inria-00258924>.



## LIITTEET

### Liite 1. Tutkimuskuljettajien ja -hakkuukoneiden kuvailutiedot.

Kuljettaja			Hakkuukone				
Koodi	Ikä, v	Työkokemus hak- kuukonetyöstä, v	Merkki	Malli	Valmistusvuosi	Hakkuupää	Puomin pituus, m
A	36	21	Komatsu	931.2	2017	C123	11
B	34	10	Ponsse	Scorpion King	2017	H6	11
C	50	28	John Deere	1170E	2015	414	10
D	36	16	John Deere	1170E	2018	413	11



**Liite 2.** Poistuman kuvailutiedot puulajeittain.

	Leimikko	Puulaji							
		Mänty		Kuusi		Koivu		Yhteensä	
		L	V	L	V	L	V	L	V
<i>Rinnankorkeusläpimitta, mm</i>	A_EH1	95	99	99	130	114	130	95	99
	A_EH2	108	104	137	131	125	118	125	118
	A_HH1	136	140	-	-	-	-	136	140
	B_EH1	113	108	-	-	-	-	113	108
	B_HH1	135	143	151	112	127	104	135	141
	B_HH2	134	146	115	127	135	-	134	146
	C_EH1*	111	114	134	117	106	109	111	113
	D_HH1	185	178	-	121	-	-	185	176
<i>Rungon kesikoko, dm<sup>3</sup></i>	A_EH1	46	53	42	55	64	97	46	53
	A_EH2	51	45	77	49	94	82	93	81
	A_HH1	127	135	-	-	-	-	127	135
	B_EH1	68	56	-	-	-	-	68	56
	B_HH1	116	133	110	42	96	50	115	128
	B_HH2	121	168	50	79	47	-	120	166
	C_EH1*	70	77	87	57	52	64	69	73
	D_HH1	262	243	-	37	-	-	262	235
<i>Poistuma, r/ha</i>	A_EH1	627	865	2	5	8	2	637	872
	A_EH2	17	12	22	3	592	751	631	766
	A_HH1	250	227	-	-	-	-	250	227
	B_EH1	639	894	-	-	-	-	639	894
	B_HH1	275	405	2	16	1	8	278	429
	B_HH2	299	240	2	6	2	-	302	246
	C_EH1*	808	735	32	74	63	174	903	983
	D_HH1	243	247	-	10	-	-	243	256
<i>Poistuma, m<sup>3</sup>/ha</i>	A_EH1	28,8	45,7	0,1	0,3	0,5	0,2	29,4	46,2
	A_EH2	0,9	0,5	1,7	0,1	55,9	61,3	58,4	62,1
	A_HH1	31,7	30,5	-	-	-	-	31,7	30,5
	B_EH1	43,4	49,6	-	-	-	-	43,4	49,6
	B_HH1	31,7	54,0	0,3	0,7	0,1	0,4	32,1	55,0
	B_HH2	36,0	40,3	0,1	0,5	0,1	-	36,2	40,8
	C_EH1*	56,4	56,6	2,8	4,2	3,3	11,1	62,5	71,9
	D_HH1	63,6	59,8	-	0,4	-	-	63,6	60,2

\*Puulajiositteeseen koivu on laskettu mukaan 5 haapaa.

### Liite 3. Tutkimuksessa käytetty haastattelulomake.

#### Tutkimuskuljettajaa koskevat tiedot

Nimi: \_\_\_\_\_ Työkokemus hakkuukonetyöstä, v: \_\_\_\_\_  
Ikä: \_\_\_\_\_  
Puhelinnumero: \_\_\_\_\_  
Sähköpostiosoite: \_\_\_\_\_  
Työssä käytetyn hakkuukoneen merkki ja malli: \_\_\_\_\_

#### Kysymysosio

##### 1. Ennakkoleimaustutkimus

1.1 Oliko poistettavien puiden merkintä riittävän selkeä?

Kyllä ☐ Ei ☐

1.2 Haittasiko peitteisyys leimattujen puiden havaitsemista?

Ei lainkaan ☐ Harvoin ☐ Joskus ☐ Usein ☐

1.3 Sijaisiko leimattuja puita sijaitisi niin vaikeissa paikoissa, ettet olisi niitä normaalissa hakkuutyössä poistanut?

Ei lainkaan ☐ Harvoin ☐ Joskus ☐ Usein ☐

1.4 Oliko ajourien sijainti merkitty ensiharvennuksella selvästi?

Kyllä ☐ Ei ☐

1.5 Miten ennakkoleimaus vaikutti hakkuutyön tekemiseen?

- a) Ennakkoleimaus helpotti hakkuutyötä.
- a) Ennakkoleimaus vaikeutti hakkuutyötä.
- c) Ennakkoleimaus ei helpottanut eikä vaikeuttanut hakkuutyötä.

1.6 Mitä hyötyjä ja haittoja havaitsit ennakkoleimauksesta ensiharvennuksella?

1.7 Mitä hyötyjä ja haittoja havaitsit ennakkoleimauksesta toisella harvennuksella?

##### 2. Poistettavien puiden valinta

2.1 Ohjaako puuvalintaa joko järeys tai laatu toistaan selkeämmin?

a. Ensiharvennuksella

Laatu ☐ Järeys ☐ Ei kumpikaan selvästi ☐

b. Toisella harvennuksella

Laatu ☐ Järeys ☐ Ei kumpikaan selvästi ☐

2.2 Mitä puun osaa keskityt havainnoimaan, kun valitset harvennuksessa poistettavia puita?

	Ensiharvennus	Toinen harvennus
a. Pääasiassa rungon alaosa (alle puolet puun pituudesta)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
b. Pääasiassa rungon yläosa ja latvusta	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
c. Runkoa ja latvusta koko puun pituudelta tasa-arvoisesti	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

2.3 Mistä lisäinformaatiosta uskot olevan hyötyä poistettavien puiden valinnassa? Vastaa asteikolla Ei lainkaan hyötyä - Merkittävä hyöty.

	Ei lainkaan hyötyä	Vähäinen hyöty	Kohtalainen hyöty	Merkittävä hyöty
1. Lisätieto puun eri osista				
a. Rungon yläosa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
b. Rungon alaosa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
c. Puun latvus	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2. Lisätiedon hyöty puulajeittain				
a. Mänty	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
b. Kuusi	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
c. Koivu	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

2.4 Mitkä seuraavista ovat kolme merkittävintä laatuominaisuutta, joiden automaattinen tunnistaminen helpottaisi puuvalintaa?

<input type="checkbox"/> Koro	<input type="checkbox"/> Poikaoksa
<input type="checkbox"/> Lenkous	<input type="checkbox"/> Oksaisuus
<input type="checkbox"/> Kaksihaaraisuus	<input type="checkbox"/> Mutka
<input type="checkbox"/> Latvakatko	<input type="checkbox"/> Jokin muu, mikä?

Perustuvatko valinnat vikojen yleisyyteen, niiden vaikeaan tunnistukseen, vai molempiin?

2.5 Käyttäisikö puuvalinnan opastukseen tarkoitettua järjestelmää?

Kyllä, jatkuvasti käyttäen ☐ Kyllä, työn tukena ☐ En lainkaan ☐

2.6 Mitä mahdollisia vaikutuksia puuvalintaa opastavasta järjestelmästä arvelet olevan?

	Kyllä	Ei	En osaa sanoa
a. Puuvalinnan opastus parantaisi korjuutyön laatua.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
b. Puuvalinnan opastus parantaisi korjuutyön tuottavuutta.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
c. Puuvalintaa opastavan järjestelmän käyttö auttaisi jaksamaan työssä.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
d. Puuvalinnan opastus heikentäisi kuljettajan kykyä suoriutua hakkuutyöstä itsenäisesti.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

2.7 Missä hakkuutavassa puuvalinnan opastuksella on mielestäsi suurempi potentiaali? Valitse sopiva vaihtoehto.

- a) ensiharvennuksella  
b) toisella harvennuksella  
c) potentiaali on yhtä suuri molemmissa hakkuutavoissa

### 3. Harvennusvoimakkuus

3.1 Metsänhoidon suositukset ohjeistavat säätelemään harvennusvoimakkuutta sallituissa rajoissa. Vaikuttavatko ohjeistuksen lisäksi seuraavat tekijät harvennusvoimakkuuteen?

	Ei vaikutusta	Kohtalainen vaikutus	Selvä vaikutusta
a. Lähtöpuuston epätasainen tilajärjestys	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
b. Lähtöpuuston laatu	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
c. Omavalvonta (muutan harvennusvoimakkuutta omavalvontamittausten perusteella)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Jokin muu tekijä, mikä?

3.3 Käyttäisikö harvennusvoimakkuuden seurantaan tarkoitettua järjestelmää?

Kyllä ☐ En ☐

**Liite 4.** Mann Whitneyn U-testin tulokset.

	Hakkuulaitteen vienti			Siirtyminen		
	n	<i>U</i>	p-arvo	n	<i>U</i>	p-arvo
A_EH1	877	89226,0	<0,193	369	11169,0	<0,004
A_EH2	474	27523,0	<0,779	205	4240,0	<0,539
A_HH1	462	20558,0	<0,001	291	9295,0	<0,255
B_EH1	556	30957,0	<0,001	274	7982,0	<0,308
B_HH1	546	28862,5	<0,001	387	16077,0	<0,649
B_HH2	337	11643,0	0,006	238	5688,0	<0,020
C_EH1	1198	15314,5	<0,001	448	22487,0	<0,282
D_HH1	316	10940,0	<0,058	160	2885,0	<0,320